

Vítor Luís
Vieira Neves

Comportamento mecânico de compósitos com aplicações navais

Orientador

Dr. Alfredo Manuel Balacó de Moraes
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Co-Orientador

Dr. António Manuel de Bastos Pereira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vítor Luís
Vieira Neves

Comportamento mecânico de compósitos com aplicações navais

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Dr. Alfredo Manuel Balacó de Moraes e Dr. António Manuel de Bastos Pereira, Professor Associado e Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro do Departamento de Engenharia Mecânica.

o júri

presidente

Dr. José Joaquim de Almeida Grácio

Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

vogais

Dr. Rui Jorge Sousa Costa de Miranda Guedes

Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dr. Rui António Silva Moreira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Dr. Alfredo Manuel Balacó de Morais

Professor Associado da Universidade de Aveiro (**Orientador**)

Dr. António Manuel de Bastos Pereira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (**Co-Orientador**)

Dedico este trabalho à minha mãe Fátima, às minhas irmãs e à minha inseparável companheira de viagem Célia pelo incansável apoio.

agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer a especial colaboração do Estaleiro Naval Delmar Conde pela parceria realizada com o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Ao Renato e ao Gilberto Conde um muito obrigado.

Ao Professor Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes o incentivo, a confiança e a partilha de conhecimentos que teve comigo ao longo deste trabalho.

Ao Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira a disponibilidade e ideias na prossecução dos ensaios experimentais.

Aos colegas que me acompanharam durante o curso, quero agradecer o companheirismo e a alegria facilitando assim esta jornada que agora termina.

Um agradecimento especial à Célia, o meu rochedo no meio do oceano com o qual poderei sempre contar.

Agradeço à minha mãe e irmãs todo o apoio que me dedicaram durante a execução da tese e da minha licenciatura. Não posso, contudo, deixar de agradecer particularmente o grande esforço financeiro feito pela minha mãe, prescindindo de muito para que este momento chegasse.

palavras-chave

Fibra de vidro, compósitos de matriz polimérica, ensaios de tracção, ensaios de corte, ensaios de compressão, ensaios de flexão, propriedades mecânicas.

resumo

Os materiais compósitos são cada vez mais utilizados em aplicações estruturais, devido às elevadas relações rigidez/peso específico e resistência/peso específico. Apesar disso, o projecto baseia-se ainda em coeficientes de segurança elevados, o que penaliza os custos dos produtos finais. O conhecimento mais profundo do comportamento mecânico dos materiais através de ensaios é fundamental para promover projectos mais eficientes.

Neste trabalho pretendeu-se caracterizar as propriedades mecânicas principais de compósitos fibra de vidro/poliéster e fibra de vidro/epóxico representativos dos que têm aplicações navais. Os laminados foram obtidos por moldação manual, que ainda é um dos processos de fabrico mais usados. Realizaram-se vários tipos de ensaios mecânicos em provetes retirados desses laminados: ensaios de tracção, compressão, flexão e corte.

Em certos casos em que os laminados tinham um reforço híbrido unidireccional - manta, verificaram-se modos de ruptura indesejados nos ensaios. Todavia, os resultados experimentais obtidos mostraram, em geral, baixas dispersões estatísticas e boa concordância de propriedades medidas em diferentes tipos de ensaios.

De salientar que se desenvolveu e implementou um novo método de ensaio à compressão, tendo em vista evitar a ruptura prematura dos provetes por encurvadura ou junto às zonas de transmissão de carga. Os resultados obtidos com esta nova abordagem revelaram-se muito positivos.

keywords

Glass fibre, polymer matrix composites, tensile tests, shear tests, compression tests, flexural tests, mechanical properties.

abstract

Composite materials are increasingly used in structural applications, due to high stiffness/specific weight and strength/specific weight relations. Nevertheless, the project is still in high safety factors, which penalizes the cost of final products. A deeper knowledge of the mechanical behaviour of materials through testing is primarily to promote projects more efficient.

This work was to characterize the major mechanical properties of composite glass fibre/polyester and glass fibre/epoxy representative of those that have marine applications. The laminates were obtained by casting manual, which is still one of the manufacturing processes used most. There were several types of mechanical tests on specimens of laminates; tensile tests, compression, flexural and shear.

In some cases where they had rolled a hybrid unidirectional reinforcement - mat, there were ways to break unwanted tests. However, the experimental results showed, in general, low dispersion statistics and good agreement of properties measured in different types of tests.

Importantly, were developed and implemented a new test method for compression in order to avoid premature rupture of the samples by buckling or adjacent to areas of load transfer. The results obtained with this new approach proved to be very positive.

Conteúdo

Lista de Figuras	3
Lista de Tabelas	5
1 Introdução	7
1.1 História	7
1.2 Contexto	8
1.3 Materiais Compósitos	8
1.3.1 As fibras	8
1.3.2 As Matrizes poliméricas	11
1.3.3 Os processos de fabrico	12
1.4 Ensaaios Mecânicos de Compósitos	13
1.4.1 Ensaaios de Tracção	15
1.4.2 Ensaaios de Compressão	16
1.4.3 Ensaaios de Corte	18
1.4.4 Ensaaios de Flexão	19
1.4.5 Conclusão	21
2 Procedimentos experimentais	23
2.1 Preparação dos provetes	23
2.2 Ensaaios	29
2.3 Tratamento de Dados	31
2.3.1 Ensaaios de tracção	31
2.3.2 Ensaaios de corte via tracção	31
2.3.3 Ensaaios de compressão	31
2.3.4 Ensaaios de flexão	33
3 Resultados experimentais dos provetes vidro(WF)/epóxido	35
3.1 Ensaaios de tracção	35
3.2 Ensaaios de corte via tracção	37
3.3 Ensaaios de compressão	41
3.4 Ensaaios de corte via compressão	44
3.5 Ensaaios de flexão	46
3.6 Conclusões relativas aos laminados vidro(WF)/epóxido	51
4 Resultados experimentais dos provetes vidro(UD)/poliéster	53
4.1 Ensaaios de tracção	53
4.2 Ensaaios de corte via tracção	59
4.3 Ensaaios de compressão	61

4.4	Ensaio de corte via compressão	66
4.5	Ensaio de flexão	68
4.6	Conclusões relativas aos laminados vidro(UD)/poliéster	74
5	Conclusões	77
	Bibliografia	79

Lista de Figuras

1.1	Várias configurações de reforço	10
1.2	Eixos principais da camada	14
1.3	Representação do provete de tracção	15
1.4	Formas de transmissão de carga nos ensaios de compressão	16
1.5	Dispositivos ensaios de compressão: IITRI e <i>Celanese</i>	17
1.6	Dispositivo ensaio de compressão: <i>sandwich</i>	18
1.7	Provelte tracção – <i>cross-ply</i>	19
1.8	Ensaio Iosipescu	19
1.9	Flexão em 3 e 4 pontos	20
2.1	Esquema do molde utilizado	25
2.2	Procedimentos de moldação manual	25
2.3	Laminado INEGI biaxial	26
2.4	Provelte à compressão	27
2.5	Molde para provetes de compressão	27
2.6	Esquema dos provetes utilizados	28
2.7	Código identificativo dos provetes	29
2.8	Montagem tracção e corte	30
2.9	Montagem flexão	30
2.10	Curva tensão–deformação do provete WF45T1	32
2.11	Comparação curvas t–d na compressão, real <i>vs</i> tratada	32
2.12	Curva força–deslocamento do provete WF0F3	33
3.1	Curvas tensão–deformação provetes WF0T	36
3.2	Fotografia dos provetes WF0T após ensaios	37
3.3	Fotografias ampliadas provetes WF0T	38
3.4	Curvas tensão–deformação provetes WF45T	39
3.5	Fotografia dos provetes WF45T após ensaios	39
3.6	Fotografias ampliadas provetes WF45T	40
3.7	Curvas tensão–deformação provetes WF0C	41
3.8	Fotografia dos provetes WF0C após ensaios	42
3.9	Fotografias ampliadas provetes WF0C	43
3.10	Fotografia ampliada provete WF0C2	43
3.11	Gráfico tensão–deformação provetes WF45C	44
3.12	Fotografia provetes WF45C após ensaios	45
3.13	Gráfico carga–deslocamento/vão provetes WF0F	46
3.14	Foto videoextensómetro WF0F	47

3.15	Fotografia dos provetes WF0F após ensaios	47
3.16	Fotografias ampliadas provete WF0F1	48
3.17	Curvas carga- δ/L provetes WF45F	49
3.18	Fotografia dos provetes WF45F após ensaios	50
3.19	Fotografias ampliadas provetes WF45F3 e WF45F6	50
4.1	Curvas tensão-deformação provetes UD0T	53
4.2	Fotografia dos provetes UD0T após ensaios	54
4.3	Fotografias ampliadas de três provetes UD0T	55
4.4	Gráfico tensão-deformação provetes UD90T	56
4.5	Fotografia dos provetes UD90T após ensaios	57
4.6	Fotografias ampliadas dos provetes UD90T	58
4.7	Curvas tensão-deformação provetes UD45T	59
4.8	Fotografia dos provetes UD45T após ensaios	60
4.9	Fotografias ampliadas do provete UD45T5	61
4.10	Curvas tensão-deformação provetes UD0C	62
4.11	Fotografia dos provetes UD0C após compressão	63
4.12	Fotografias ampliadas do provete UD0C3	63
4.13	Curvas tensão-deformação provetes UD90C	64
4.14	Fotografia dos provetes UD90C após compressão	65
4.15	Fotografias ampliadas do provete UD90C3	65
4.16	Curvas tensão-deformação provetes UD45C	66
4.17	Fotografia dos provetes UD45C após compressão	67
4.18	Fotografias ampliadas do provete UD45C3	68
4.19	Curvas carga-deslocamento/vão provetes UD0F	69
4.20	Fotografia dos provetes UD0F após flexão	70
4.21	Fotografias ampliadas dos provetes UD0F	70
4.22	Curvas carga-deslocamento/vão dos provetes UD45F	71
4.23	Fotografia dos provetes UD45F após flexão	72
4.24	Fotografias ampliadas dos provetes UD45F3	73

Lista de Tabelas

1.1	Propriedades de materiais convencionais <i>vs</i> compósitos	9
1.2	Propriedades da fibra de vidro	9
1.3	Combinações de catalizador e acelerador	12
1.4	Dimensões dos provetes de tracção - ISO 527	16
1.5	Dimensões recomendadas ISO 14125	20
2.1	Espessuras dos laminados	24
2.2	Dimensões nominais dos provetes	28
3.1	Tabela resultados WF0T	36
3.2	Tabela resultados WF45T	38
3.3	Tabela resultados WF0C	42
3.4	Tabela resultados WF45C	45
3.5	Tabela resultados WF0F	47
3.6	Tabela resultados WF45F	49
3.7	Resumo - módulos de elasticidade	51
3.8	Resumo - Resistências	52
4.1	Tabela resultados UD0T	54
4.2	Tabela resultados UD90T	56
4.3	Tabela resultados UD45T	59
4.4	Tabela resultados UD0C	61
4.5	Tabela resultados UD90C	62
4.6	Tabela resultados UD45C	67
4.7	Tabela resultados UD0F	69
4.8	Tabela resultados UD45F	73
4.9	Resumo - módulos de elasticidade	74
4.10	Resumo - Resistências	75

Capítulo 1

Introdução

1.1 História

O aparecimento do conceito de reforço com fibras é muito antigo. Aparece em referências bíblicas, no antigo Egito, em que eram utilizados tijolos reforçados com fibras de palha [1]. No séc. XIX eram utilizados tirantes em ferro para reforçar alvenaria, o que conduziu posteriormente ao desenvolvimento do betão reforçado com aço. Porém, só no início do séc. XX é que o conceito moderno de material compósito se materializa com as resinas fenólicas reforçadas por fibras de amianto. Meio século depois iniciam-se as aplicações estruturais destes materiais, mais precisamente em 1942 com o primeiro barco a ser construído em compósito de fibra de vidro [2]. Essa construção foi realizada na ressaca da segunda Grande Guerra, tendo como patrocinador a marinha norte americana. A embarcação tinha um comprimento de linha de água (*Water line*) de 28 pés [3]. Na década de sessenta a construção de barcos em fibra de vidro prolifera, devido ao baixo custo de produção de cascos nestes materiais e à virtual ausência de manutenção, sobretudo em relação aos cascos de madeira, com elevados custos de produção e manutenção. É de salientar que o fraco conhecimento das propriedades mecânicas destes materiais emergentes fez com que os construtores optassem por soluções demasiado conservadoras, de modo a garantir a fiabilidade das estruturas. Estes cascos muito sobredimensionados evitavam também os elevados custos de ensaios de protótipos em tamanho real.

A evolução constante dos materiais e dos processos de fabrico, bem como a experiência adquirida pelos estaleiros navais ao longo dos últimos 50 anos, tem permitido construir barcos em compósitos de matriz polimérica (*Fibre Reinforced Polymer* - FRP) com maior fiabilidade, menor peso e maior resistência. Vários factores contribuem para o aumento da utilização destes materiais, alguns associados a propriedades específicas que eles apresentam, tais como a resistência à corrosão, resistência ao impacto, amortecimento de vibrações, baixo peso específico; outros associados aos processos, isto é, a possibilidade de construção de formas complexas, com poucas peças (por exemplo, um casco de uma só peça), facilidade de produção, pouca manutenção e reparação. É este conjunto de características vantajosas que torna estes materiais tão apetecíveis

em aplicações estruturais, nomeadamente, as navais.

1.2 Contexto

Portugal conta com uma longa história naval que teve um período áureo por altura dos descobrimentos. A grande extensão de costa de que dispõe o país é o grande móbil para que esta indústria prolifere. Tendo uma laguna com vários portos de abrigo, o Porto Comercial e alguns estaleiros navais espalhados pela região, Aveiro apresenta condições particularmente favoráveis ao desenvolvimento desta indústria. Se a estas condições se juntarem as novas tecnologias, novos materiais e os conhecimentos que advêm da experiência dos construtores navais, será possível esta indústria desenvolver-se consideravelmente num futuro próximo. Este trabalho surge precisamente no contexto de contactos com uma empresa da região de Aveiro.

1.3 Materiais Compósitos

Os materiais estruturais podem ser divididos em quatro categorias principais: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos [4]. Relativamente aos compósitos, estes consistem na combinação de dois ou mais materiais distintos, tipicamente provenientes dos outros três grupos, de tal forma que o material resultante seja uma estrutura estável. No compósito distinguem-se habitualmente a matriz e o reforço. A ligação entre ambos é ao nível da superfície de contacto. Desta forma, tanto o reforço como a matriz, mantêm as suas propriedades físicas e químicas, produzindo contudo, um material com propriedades tais que seria impossível obter de cada constituinte isoladamente. Existem vários tipos de compósitos, dependendo a sua classificação principalmente do tipo de matriz. Os compósitos reforçados com fibras oferecem combinações de resistência e módulo comparáveis ou mesmo superiores às dos tradicionais materiais metálicos (tabela 1.1). Além disso, face ao baixo peso específico, as relações resistência/peso e módulo/peso tornam os compósitos nitidamente superiores aos seus concorrentes metálicos. São estas características que os tornam excelentes em aplicações em que o peso dos componentes é crítico.

1.3.1 As fibras

Os compósitos estruturais usam principalmente fibras de vidro, de carbono, de aramida e, em muito menor grau, fibras de boro. Uma vez que este trabalho se centra nos compósitos de fibra de vidro, que são claramente dominantes nas aplicações navais, descrevem-se em seguida as características principais destas fibras (Tabela 1.2).

Relativamente às outras fibras, as principais vantagens da fibra de vidro consistem no seu baixo custo, elevados valores da tensão de ruptura, σ_u , elevada resistência química e excelentes propriedades de isolamento. As desvantagens são o baixo valor do módulo de Young, E , e a elevada densidade, ρ . A elevada dureza da fibra de vidro causa também desgaste dos moldes e das

Tabela 1.1: Propriedades mecânicas de alguns materiais convencionais e de compósitos estruturais [5].

Material	ρ (g/cm^3)	E (GPa)	σ_u (MPa)	σ_0 (MPa)	E/ρ ($10^6 m$)	σ_u/ρ ($10^3 m$)
aço SAE 1010 (conformado a frio)	7.87	207	365	303	2.68	4.72
aço AISI 4340 (temperado)	7.87	207	1722	1515	2.68	22.3
AL 6061-T6 liga alumínio	2.7	68.9	310	275	2.60	11.7
AL 7178-T6 liga alumínio	2.7	68.9	606	537	2.60	22.9
Ti-6Al-4V liga titânio	4.43	110	1171	1068	2.53	26.9
17-7 PH aço inoxidável	7.87	196	1619	1515	2.54	21.0
INCO 718 liga de níquel	8.2	207	1399	1247	2.57	17.4
Carbono/epóxico (alta resistência) unidirecional	1.55	137.8	1550	—	9.06	101.9
Carbono/epóxico (alto módulo) unidirecional	1.63	215	1240	—	13.44	77.5
Vidro-E/epóxico unidirecional	1.85	39.3	965	—	2.16	53.2
Kevlar/epóxico unidirecional	1.38	75.8	1378	—	5.60	101.8
Boro/6061 Al temperado	2.35	220	1109	—	9.54	48.1
Carbono/epóxico quasi-isotrópico	1.55	45.5	579	—	2.99	38.0

Tabela 1.2: Propriedades da fibra de vidro.

Fibra	D_t (μm)	ρ (g/cm^3)	E (GPa)	σ_u (MPa)	ε_u (%)	α_t ($10^{-6}/^{\circ}C$)	ν
vidro-E [5]	10	2.54	72.4	3450	4.8	5	0.2
vidro-S [5]	10	2.49	86.9	4300	5.0	2.9	0.22
vidro-C [1]	—	2.55	86.0	4400	5.2	4	—

ferramentas de corte [5]. São dois os tipos de fibra de vidro habitualmente utilizados no reforço de polímeros: vidro-E e vidro-S. Há ainda o vidro-C para aplicações com elevados requisitos de resistência à corrosão. Por seu turno, é a fibra de vidro-S que apresenta maior tensão de ruptura. Contudo, a composição química e os custos na produção superiores tornam-na bastante mais dispendiosa do que o vidro-E. Para diminuir estes custos foi desenvolvida a fibra de vidro-S2, com propriedades mecânicas semelhantes à do vidro-S original, mas com especificações de fabrico menos exigentes. O principal constituinte das fibras de vidro é a sílica (SiO_2), que forma

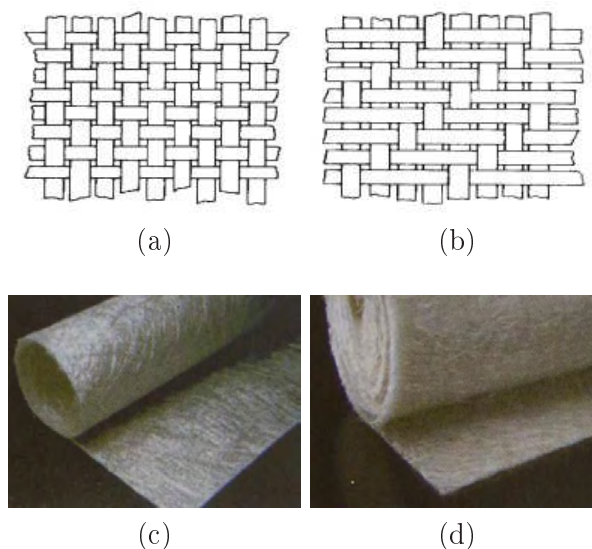


Figura 1.1: Representação de algumas configurações de reforço: (a) *Plain Weave* [3], (b) *Twill Weave* [3], (c) *Continuous Random Mat* [1] e (d) *Chopped Strand Mat* [1].

uma longa rede molecular tridimensional amorfa de propriedades isotrópicas [5]. Outros óxidos como o B_2O_3 e Al_2O_3 são adicionados para modificar a estrutura molecular e conferir às fibras certas propriedades específicas. O fabrico consiste no estiramento de vidro fundido através de feira em liga de platina-ródio com orifícios de aproximadamente $10\ \mu m$. Os filamentos são revestidos com agentes lubrificante, anti-estático e ligante promotor da adesão à matriz. Posteriormente, são agrupados num feixe com cerca de 200 filamentos e enrolados em bobine. As fibras são comercializadas sob várias formas (figura 1.1). O feixe (*Strand*) é um conjunto base de vários filamentos paralelos a partir do qual são feitas todas as outras configurações. O *Roving* é um agregado de feixes enrolado em bobine usado em moldação contínua, por exemplo, na produção de perfis por pultrusão. O *Roving* pode ser pré-impregnado com uma fina camada de resina polimérica para formar *prepegs*. Os *Chopped strands* são produzidas pelo corte de feixes em comprimentos de 3.2 a 12.7 mm, muito usados na moldação por injeção. Nas mantas (*mats*) as fibras são distribuídas aleatoriamente e agregadas com um ligante especial que confere estabilidade. As mantas são comercializadas em três formas: CSM-*Chopped Strand Mat*, de

filamentos cortados com comprimentos até 50.8 mm (figura 1.1d), CRM-*Continuous Random Mat*, de filamentos contínuos (figura 1.1c) e as mantas de superfície. As fibras de vidro trituradas para comprimentos de 0.79 a 3.2 mm são utilizadas na indústria de plásticos e não possuem características de reforço. As fibras de vidro estão ainda frequentemente disponíveis na forma de tecidos entrelaçados (*woven fabrics*) segundo direcções perpendiculares (figuras 1.1a e 1.1b).

1.3.2 As Matrizes poliméricas

A matriz desempenha três funções principais nos compósitos reforçados com fibras: dar forma estável ao compósito, transferir carga para as fibras e protegê-las da abrasão mecânica e dos factores ambientais. A matriz tem um papel menor na capacidade de carga dos compósitos, embora influencie significativamente certas propriedades. Os polímeros usados como matriz são sobretudo de dois tipos: os termoendurecíveis e os termoplásticos. Os polímeros termoplásticos são constituídos por moléculas ligadas por forças fracas, tais como ligações de Van der Waals e pontes de hidrogénio. Estas ligações intermoleculares podem ser temporariamente desfeitas se se sujeitar o polímero a determinadas pressões e temperaturas. Este passa então de um estado sólido a um estado de fluidez que permite a conformação. Mediante arrefecimento formam-se novamente ligações intermoleculares e obtém-se um sólido com a forma pretendida [6]. Uma vantagem dos polímeros termoplásticos é poderem ser re-conformados, embora com alguma degradação das suas propriedades. Além disso, apresentam geralmente maior tenacidade e menor higroscopicidade do que os termoendurecíveis. Todavia, a impregnação de fibras contínuas é mais difícil e as pressões exigidas são consideráveis. Os polímeros termoendurecíveis são constituídos por moléculas que estão ligadas quimicamente formando uma rede rígida tridimensional. Uma vez formada a ligação química no processo de polimerização (cura), o polímero não pode ser reprocessado pela aplicação de pressão e temperatura [6]. Uma das grandes vantagens dos termoendurecíveis em relação aos termoplásticos é a maior facilidade de impregnação das fibras, dado que, antes da cura, apresentam viscosidades bastante inferiores. Os termoendurecíveis mais utilizados em aplicações navais são as resinas epóxicas e os poliésteres insaturados. As resinas epóxicas são polímeros que podem ser processados sobre uma grande variedade de condições. Apresentam duas importantes vantagens em relação ao poliéster insaturado: podem ser parcialmente curadas e armazenadas para posterior utilização e têm menor contracção na cura. Contudo, a viscosidade de resinas epóxicas convencionais é superior à das resinas de poliéster. A maior limitação das epóxicas encontra-se no elevado tempo de cura e na perda de propriedades quando processadas em ambientes quentes e húmidos. Além disso, o custo final é claramente superior ao dos poliésteres. São ainda conhecidas pelas boas propriedades químicas, boa resistência à corrosão, boas propriedades mecânicas, eléctricas, térmicas e excelente capacidade de adesão a uma grande variedade de materiais. Estão disponíveis no mercado um largo leque de resinas epóxicas, cujas formulações permitem melhorar determinadas propriedades específicas. Para se desencadear o processo de cura é necessário adicionar um composto endurecedor. O tipo

e a quantidade adequada deste composto dependem do método de processamento, das condições do processo de cura (tempo e temperatura), das propriedades químicas e físicas desejadas, das limitações ambientais e do custo. Para além dos agentes de cura podem ainda ser adicionados à resina epóxida diluentes e modificadores. Os diluentes reduzem a viscosidade, enquanto que os modificadores servem para melhorar as propriedades mecânicas, aumentar a resistência às variações térmicas e aumentar a tenacidade.

Por seu turno, as resinas de poliéster são as mais usadas em compósitos devido ao baixo custo, excelente processabilidade e boas propriedades de resistência química e mecânica. Fazem parte da composição química dos poliésteres, ácidos insaturados e saturados, que são depois dissolvidos num monómero reactivo que é o estireno. A tenacidade pode ser melhorada através do aumento da relação entre ácidos insaturados e saturados. Além do poliéster é ainda necessário adicionar um catalisador para se dar a reacção e, por vezes, adiciona-se também um agente acelerador. A dosagem correcta destes dois componentes é essencial para que o tempo de gelificação seja suficiente para o trabalho a realizar. A tabela 1.3 apresenta algumas combinações possíveis de catalizador e acelerador para resinas poliéster. As duas formas de resina poliéster utilizadas na

Tabela 1.3: Combinações de catalizador e acelerador para resinas poliéster [3].

Catalizador	Acelerador
peróxido de metil-etil-cetona (MEKP)	naftenato de cobalto
hidroperóxido de cumeno	naftenato de manganês

indústria naval são a ortoftálica e isoftálica. As resinas ortoftálicas foram as primeiras a ser desenvolvidas para aplicações navais, continuando actualmente a ser muito utilizadas. Todavia, apresentam limitações ao nível da estabilidade térmica, resistência química e processabilidade. As resinas isoftálicas têm melhores propriedades mecânicas, melhor resistência química e menor permeabilidade, característica que as torna óptimas para ‘*gel coats*’, barreira de protecção exterior para os laminados. Um dos maiores problemas inerentes às resinas poliéster é a estabilidade dimensional (contração) no processo de cura. A contração do material tem um efeito negativo no acabamento superficial dos laminados, pois o reforço de fibra de vidro tem tendência a ficar marcado na superfície. Este problema pode, no entanto, ser ultrapassado com a adição de aditivos termoplásticos na formulação da resina, sendo assim possível reduzir ou até eliminar os problemas da contração. As resinas de poliéster podem ser formuladas com determinadas propriedades específicas através da selecção de diferentes ácidos/anidridos, glicóis, ou mediante variação das relações dos componentes saturados/insaturados e no diluente.

1.3.3 Os processos de fabrico

Há actualmente um vasto conjunto de técnicas de fabrico de peças em materiais compósitos de matriz polimérica. Os processos de fabrico podem ser genericamente classificados em dois tipos

fundamentais: processos em molde aberto e processos em molde fechado. Nos primeiros, apenas uma das superfícies tem bom acabamento, mas obtêm-se facilmente peças de grandes dimensões e de geometria complexa. Nos segundos, as peças obtidas apresentam excelente acabamento nas duas superfícies e elevada reprodutibilidade. A utilização de moldes fechados apresentam outra vantagem significativa: a limitação das emissões de produtos voláteis prejudiciais à saúde, como é o caso do estireno, que está presente nas resinas de poliéster. De facto, tem havido evoluções nos processos de fabrico motivadas pela necessidade de satisfazer normas internacionais relativas às emissões de estireno: Além disso, há exigências crescentes de qualidade e de propriedades mecânicas. Daí que tenha aumentado a utilização de processos de moldação com vácuo [3] e com transferência de resina a baixa pressão para molde fechado (*Resin Transfer Moulding - RTM*). Não obstante, a moldação por projecção (*spray lay-up*) e a moldação manual (*hand lay-up*) são os processos de fabrico mais usados na construção naval, representando actualmente 95% da produção mundial de componentes e cascos de navios [3]. A moldação por projecção recorre a uma pistola para fazer a deposição de fibra cortada de *roving* e resina sobre o molde. O material depositado é posteriormente deixado a curar nas condições de temperatura e pressão ambiente. As vantagens deste processo residem no baixo custo das ferramentas, deposição rápida da fibra de vidro e nas baixas exigências de formação do operador. A principal desvantagem são as fracas propriedades das peças inerentes à utilização de fibras cortadas, o que torna o processo inadequado para aplicações estruturais. Por seu turno, a moldação manual é adequada à utilização de fibras contínuas sob a forma de tecidos ou mantas. As camadas de reforço são impregnadas manualmente com resina usando rolos ou trinchas. O processo de cura realiza-se habitualmente à temperatura e pressão ambiente. Os laminados obtidos apresentam alguns defeitos, nomeadamente bolhas de ar (vazios) e baixo teor de fibra. Na realidade, a qualidade do laminado depende da perícia do operador. Todavia, trata-se de um processo de baixo custo e que permite obter laminados estruturais. Atendendo também à maior utilização desta técnica no tecido empresarial do distrito de Aveiro, os materiais estudados neste trabalho são obtidos precisamente por moldação manual.

1.4 Ensaios Mecânicos de Compósitos

Antes de se realizar qualquer ensaio, é necessário decidir qual o fim a que ele se destina, pois os custos podem ser muito significativos. Os ensaios podem destinar-se ao controlo da qualidade, à comparação entre materiais para posterior selecção ou à obtenção de propriedades para projecto. Um problema que tem que ser tratado nesta fase inicial diz respeito à obtenção das amostras, que devem ser o mais representativas possível do componente. Desde logo, é necessário garantir que os processos de fabrico das amostras e do componente sejam o mais semelhantes possível. É também particularmente importante assegurar a representatividade ao nível do teor de fibra, que influencia fortemente as propriedades dos compósitos. Exigem-se ainda cuidados na preparação dos provetes, sobretudo nas operações de corte, para evitar geração de danos antes

dos ensaios. Os compósitos de matriz polimérica apresentam outras características susceptíveis de gerar problemas nos ensaios. A natureza polimérica da matriz introduz carácter viscoelástico em algumas componentes do comportamento mecânico dos compósitos. A anisotropia é outra característica que necessita de ser considerada, pois torna necessário um maior número de ensaios para a caracterização. Por outro lado, os efeitos de transmissão de carga, também conhecidos como efeitos de St. Venant, são muito mais pronunciados do que nos materiais isotrópicos. Estes efeitos, associados à forte anisotropia das resistências, podem conduzir a modos de ruptura indesejados que invalidam os resultados dos ensaios. Este trabalho centra-se na determinação das propriedades mecânicas no plano médio através da espessura (figura 1.2) de laminados vidro/poliéster e vidro/epóxico de fibras contínuas. A metodologia de caracterização destes materiais baseia-se na medição das propriedades da camada, usando vulgarmente laminados ditos unidireccionais [1-5]. Assim, no que diz respeito às propriedades elásticas, os objectivos são a medição experimental:

- do módulo de elasticidade longitudinal E_1 , na direcção 1 das fibras;
- do módulo de elasticidade transversal E_2 , na direcção 2 perpendicular à das fibras e à da espessura 3;
- do coeficiente de Poisson longitudinal ν_{12} ;
- do módulo de corte G_{12} .

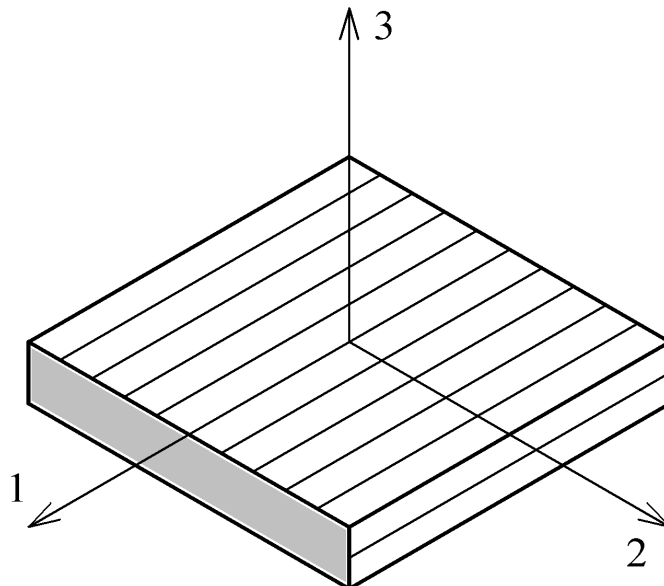


Figura 1.2: Eixos principais da camada [1]: o eixo 1 é o da direcção das fibras e o eixo 3 é o da direcção perpendicular ao plano da camada.

Relativamente às resistências, a caracterização da camada exigirá a determinação das resistências:

- à tracção longitudinal σ_{ut1} ;
- à compressão longitudinal σ_{uc1} ;
- à tracção transversal σ_{ut2} ;
- à compressão transversal σ_{uc2} ;
- ao corte τ_{u12} .

Os métodos de ensaio actualmente existentes são seguidamente revistos.

1.4.1 Ensaios de Tracção

Os ensaios de tracção aplicam-se principalmente a laminados unidireccionais dos tipos $[0]_n$ e $[90]_n$. Nos primeiros medem-se E_1 , ν_{12} e σ_{ut1} , enquanto nos segundos obtêm-se E_2 e σ_{ut2} . A geometria do provete (figura 1.3) é objecto de normas internacionais, como a ISO 527 (tabela 1.4) e a ASTM D3039.

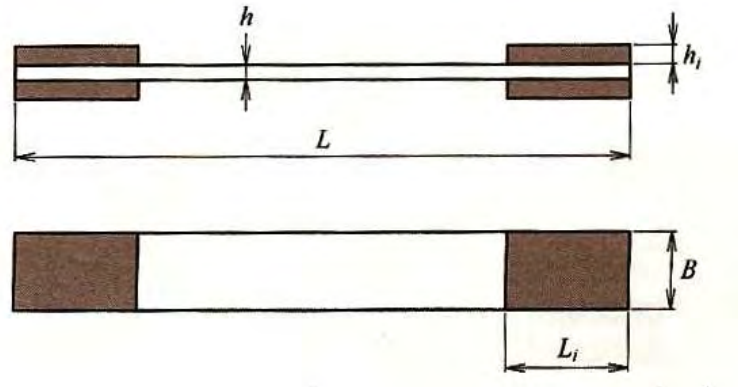


Figura 1.3: Representação esquemática de um provete para ensaios de tracção [1].

As normas preconizam a utilização de insertos colados ao provete por adesivos estruturais. Estes insertos destinam-se a transferir a carga das maxilas da máquina de ensaios para o provete sem o danificar. Os materiais mais utilizados são ligas de alumínio e compósitos de fibra de vidro do tipo $[\pm 45]_n$. Os provetes são relativamente longos devido aos efeitos de transmissão de carga, mais pronunciados nos provetes a $[0]_n$ devido às elevadas σ_{ut1} . Não obstante, é relativamente frequente verificarem-se modos de ruptura indesejados, como fissuração transversal generalizada (*splitting*) e ruptura junto aos insertos. Por seu turno, a medição de E_1 e de ν_{12} exige o recurso a extensómetros, que cada vez mais se baseiam na tecnologia de vídeo.

Tabela 1.4: Dimensões dos provetes recomendadas pela norma ISO 527.

Laminado	L (mm)	B (mm)	h (mm)	L_i (mm)	h_i (mm)
$[0]_n$	250	15	1.0	50	0.5–2.0
$[90]_n$	250	25	2.0	50	0.5–2.0
Multi-direccional	≥ 200	12.5–25	1.0–10.0	45	≥ 2.0

1.4.2 Ensaios de Compressão

Os ensaios de compressão de laminados do tipo $[0]_n$ têm-se revelado os mais complicados de realizar. O problema principal é a forte propensão para a encurvadura. De forma a minimizar este fenómeno, o comprimento livre dos provetes tem de ser muito pequeno, tipicamente inferior a 12 mm, o que acentua efeitos de St. Venant [1] e promove geralmente a ruptura junto aos insertos colados. Há quatro ensaios diferentes contemplados nas normas ASTM D695, ASTM D3410, ASTM D5467 e ASTM D6641. A norma ASTM D695 foi inicialmente desenvolvida para ensaiar plásticos não reforçados com provete tipo *dog-bone*. A carga é aplicada no topo dos provetes (figura 1.4), que são envolvidos por guias laterais para evitar encurvadura. Este ensaio, designado por ASTM D695 modificado, promove nos provetes do tipo $[0]_n$ fissuras transversais que se propagam dos topos até ao centro. Todavia, tem-se mostrado adequado para medir σ_{uc2} com provetes $[90]_n$.

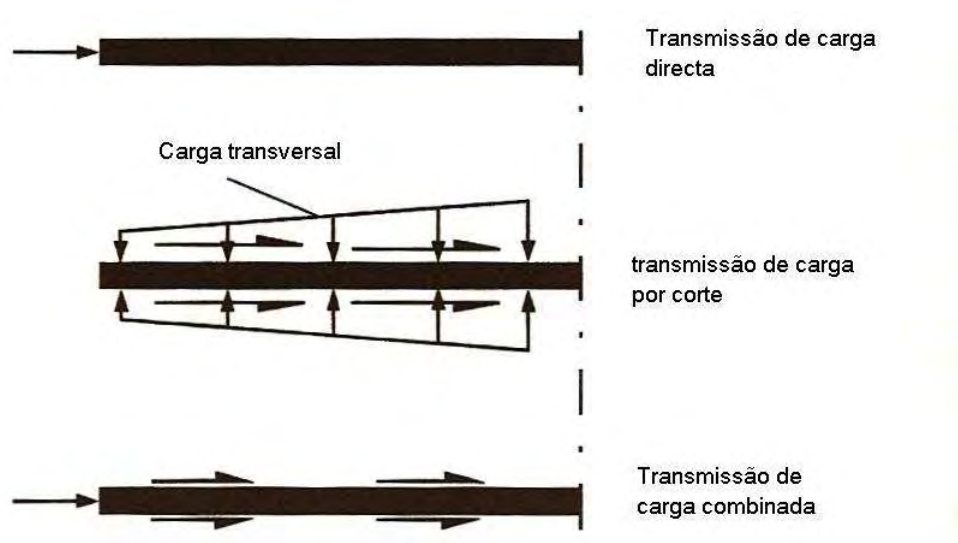


Figura 1.4: Formas de transmissão de carga nos ensaios de compressão [7].

As normas ASTM D3410 e ASTM D5467 definem os dispositivos ITRI (*Illinois Institute of Technology Research Institute*) e *Celanese* (figuras 1.5a e 1.5b), respectivamente, nos quais a transferência de carga é feita por corte (figura 1.4). Procura-se deste modo evitar a fissuração transversal observada quando a carga é aplicada nos topos, mas permanece o problema dos efeitos de St. Venant. Além disso, os dispositivos de ensaio requerem tolerâncias apertadas, sobretudo o *Celanese*. A combinação das duas formas de transferência de carga anteriores culminou na

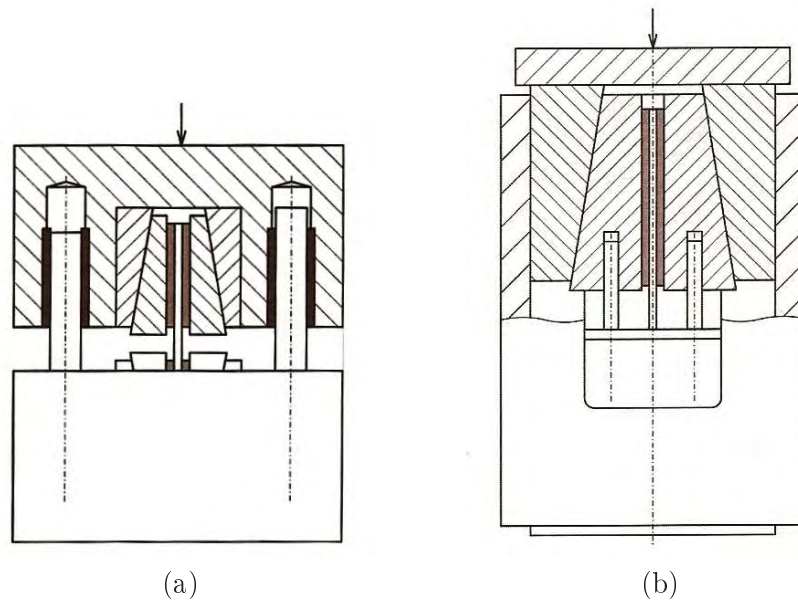


Figura 1.5: Dispositivos utilizados em ensaios de compressão [1]: (a) ITRI e (a) *Celanese*.

norma ASTM D6641, conhecida na literatura como *combined loading compression* (CLC). Este ensaio tem vantagens importantes em relação aos métodos já referidos: um dispositivo relativamente simples e compacto, não são necessários insertos e a razão entre as forças de compressão e as forças de corte pode ser ajustada tendo em vista a melhoria dos resultados [4]. Finalmente, a norma ASTM D5467 já referida define também um ensaio de flexão em 4 pontos (figura 1.6) de um provete *sandwich*, cuja pele superior é um laminado $[0]_n$ do compósito em estudo. O núcleo é de ninho de abelha metálico para promover o suporte lateral e evitar ruptura prematura por encurvadura da pele superior. A pele inferior é em chapa metálica mais espessa [1]. A principal desvantagem deste ensaio é o elevado custo do provete.

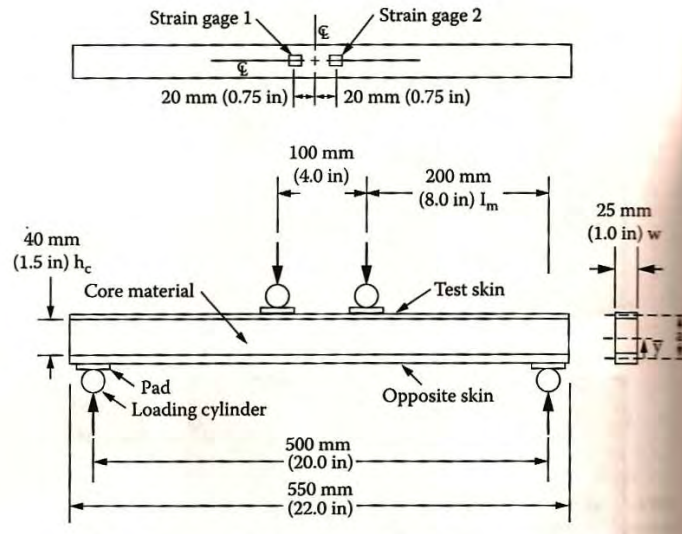


Figura 1.6: Ensaio de compressão com um provete *sandwich* [7].

1.4.3 Ensaios de Corte

Um dos ensaios mais usado para caracterizar o comportamento ao corte é o ensaio de tracção de laminados do tipo $[\pm 45]_n$. Este método é descrito pelas normas BS EN ISO 14129 e ASTM D3518. O provete é rectangular com 250 mm de comprimento, 25 mm de largura e 2 mm de espessura (figura 1.7). Os provetes podem ter ou não insertos, que caso sejam utilizados, devem ser de compósito de fibra de vidro também do tipo $[\pm 45]$ com espessura de 0.5 mm a 2 mm. Com este ensaio é possível obter bons resultados para o módulo de corte, G_{12} , mas são questionáveis os valores da resistência e da deformação à ruptura. Isto deve-se ao facto das camadas estarem sujeitas a um estado de tensão que não é de corte puro. De facto, as tensões normais σ_1 e σ_2 são da mesma ordem de grandeza das tensões de corte. Além disso, a ruptura do laminado envolve fissuração, delaminagens e deformações finais por vezes muito elevadas. O ensaio de tracção de laminados unidireccionais do tipo $[10]_n$ é também bastante utilizado, apesar de não estar normalizado. Este laminado foi escolhido de modo a minimizar o efeito das tensões normais na resposta ao corte [7]. Apesar da aparente simplicidade, a obtenção do comportamento tensão-deformação ao corte exige uma roseta de três extensómetros, e a ruptura do provete tende a dar-se junto às amarras devido aos constrangimentos locais às deformações de corte.

Um outro método é o ensaio de corte em calha, descrito pela norma ASTM D4255, com duas configurações possíveis: calha dupla e calha tripla. É utilizado em laminados dos tipos $[0]_n$, $[90]_n$ ou multidireccionais [7]. Os principais problemas destes ensaios são a existência de tensões normais espúrias e a tendência para danificação junto aos furos usados para aplicação dos parafusos de transmissão da carga. Finalmente, no ensaio Iosipescu (ASTM D5379) submete-se um provete duplamente entalhado a forças de corte através do dispositivo da figura 1.8. Estudos iniciais indicavam um estado de corte puro na zona entre entalhes com provetes $[0]_n$ e $[90]_n$.

Análises numéricas mais recentes vieram desmentir essa tese. Além disso, a maquinagem dos entalhes é delicada e o provete é sensível a desalinhamentos.

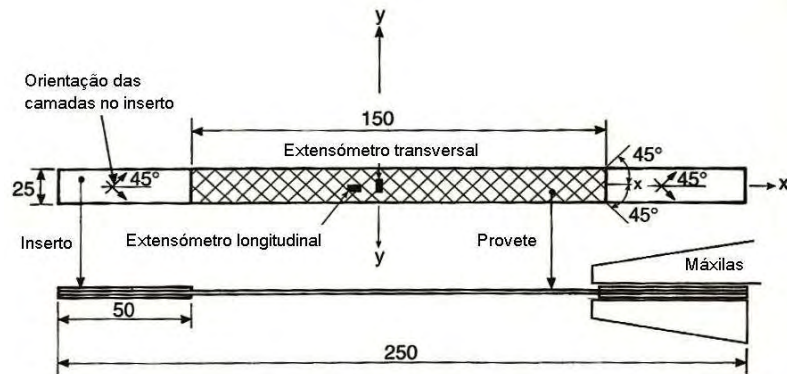


Figura 1.7: Representação esquemática do provete utilizado em ensaios de tracção via corte, $[\pm 45]$ [7].

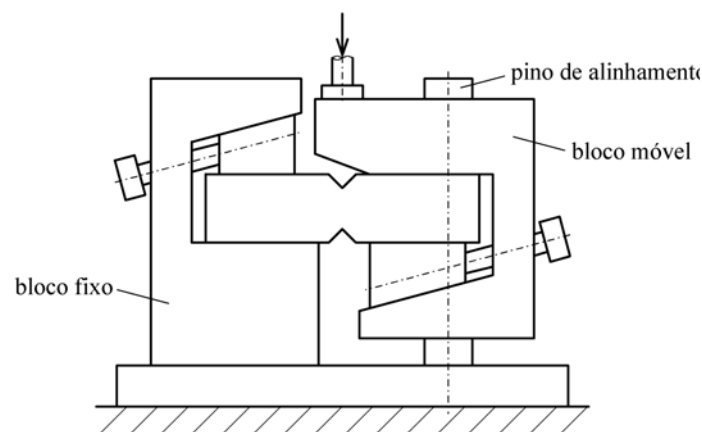


Figura 1.8: Ensaio Iosipescu [1] segundo a norma ASTM D 5379.

1.4.4 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão são muito utilizados em controlo de qualidade devido a simplicidade dos procedimentos e equipamentos. Todavia, não permitem obter valores de propriedades para projecto, pois o estado de tensão no provete não é uniforme e os resultados obtidos são muito sensíveis à espessura do provete. O objectivo é geralmente a obtenção do módulo E_1 e da resistência longitudinal mínima usando provetes $[0]_n$. As duas variantes do ensaio de flexão designam-se por flexão em 3 pontos e flexão em 4 pontos, conforme o número total de suportes e de pontos de carregamento (figura 1.9). Embora o volume de material sujeito às tensões máximas seja maior no ensaio de flexão de 4 pontos, o ensaio de flexão em 3 pontos é mais simples e é considerado suficiente para controlo de qualidade. A tabela 1.5 resume as dimensões

1.4.5 Conclusão

O estudo bibliográfico realizado identificou inicialmente as características principais dos materiais compósitos que vão ser objecto de estudo experimental neste trabalho. Seguidamente efectuou-se uma breve revisão dos processos de fabrico e dos principais ensaios actualmente existentes para caracterização do comportamento mecânico dos referidos materiais. Apesar dos ensaios serem objecto de várias normas internacionais, subsistem dificuldades importantes na obtenção de resultados válidos, sobretudo nos ensaios de compressão e de corte. A estas dificuldades acrescem as que resultam das características específicas dos compósitos vidro/poliéster e vidro/epóxico a estudar. Na realidade, tratando-se de compósitos obtidos através de moldação manual, era desde logo fundamental garantir alguma consistência no fabrico de amostras de modo a evitar dispersões elevadas nas propriedades a medir. Por outro lado, face às características específicas dos materiais estudados, as recomendações das normas nem sempre poderiam ser seguidas. No final, esperava-se medir com sucesso os módulos e as resistências de compósitos vidro/poliéster e vidro/epóxico representativos dos que têm aplicações navais.

Capítulo 2

Procedimentos experimentais

2.1 Preparação dos provetes

Os provetes foram cortados de laminados produzidos no Instituto de Engenharia e Gestão Industrial (INEGI) e no estaleiro naval Delmar Conde. Em ambos os casos, recorreu-se à moldação manual pelas razões referidas no capítulo 1. Os laminados produzidos no INEGI tiveram como matriz a resina epóxida SR1500 da SICOMIN, tendo sido usado o endurecedor SD2505. O reforço empregue foi um tecido (*woven fabric*) de fibra de vidro bidireccional do tipo ‘*plain weave*’ com densidade superficial $S_f=600$ g/m². Esta grandeza é habitualmente designada na indústria por ‘gramagem’. Estes laminados são doravante designados por vidro(WF)/epóxido.

Por seu turno, nos laminados produzidos na Delmar Conde a matriz foi a resina poliéster insaturada isóftalica em solução de estireno AROPOL IS 4633 com o catalizador PEROXAN ME-50 LS-P10. O reforço foi um tecido de fibra de vidro híbrido unidireccional(UD)-tecido de filamentos contínuos de $S_f=380$ g/m². O tecido UD era claramente predominante com $S_f=300$ g/m², pelo que os laminados são aqui designados por vidro(UD)/poliéster. De acordo com o técnico responsável da empresa, a incorporação da manta entre camadas de tecido UD permite reduzir a propensão à delaminação.

O dimensionamento da espessura das placas e do número de camadas, n , baseou-se na estimativa da fracção volúmica de fibra

$$v_f = \frac{S_f}{h_c \rho_f} \quad (2.1)$$

sendo ρ_f a densidade da fibra e h_c a espessura da camada do laminado. Teve-se também em conta que a espessura total do laminado $h_l = n h_c$ deveria evitar cargas de ruptura excessivas para a máquina universal de ensaios. Por seu turno, as sequências de empilhamento foram dos tipos $[0]_n$ e $[\pm 45]_n$ de modo a permitir a medição das propriedades da camada identificadas na secção 1.4. A tabela 2.1 resume as características básicas dos laminados.

Tabela 2.1: Resumo das espessuras e do número das camadas dos laminados.

laminado	Sequência de empilhamento	S_f (g/m ²)	n	h_l (mm)	h_c (mm)	v_f (%)
vidro(WF)/epóxido	[0] ₇	600	7	3.9	0.557	42.4
vidro(WF)/epóxido	[(±45) ₃ /45]	600	7	3.9	0.557	42.4
vidro(UD)/poliéster	[0] ₅	380	5	3	0.6	24.9
vidro(UD)/poliéster	[(±45) ₂ /45]	380	5	3	0.6	24.9

Densidade da fibra de vidro, $\rho_f=2540$ kg/m³

A execução das placas seguiu as seguintes etapas:

- corte das camadas de tecido de acordo com as dimensões e orientações planeadas; teve-se especial cuidado com o tecido cortado a ± 45 , devido a sua instabilidade junto aos cantos, onde as fibras apresentavam um comprimento muito reduzido;
- desgorduramento do molde inferior, que foi simplesmente uma placa de aço (figuras 2.1 e 2.2a); usou-se acetona para as placas de vidro(WF)/epóxido e o produto CRC - *Industrial Degreaser* para as de vidro(UD)/poliéster;
- Aplicação de desmoldante na base, na tampa e nas barreiras; utilizou-se o produto Loctite 770NC para as placas de vidro(WF)/epóxido e o produto OKS-1361, agente separador de silicone, para as de vidro(UD)/poliéster;
- preparação das resinas (figura 2.2b); mistura da resina epóxida SR1500 com o endurecedor SD2505 nas proporções de 100 g de resina para 33 g de endurecedor (figura 2.2b); mistura da resina poliéster insaturada isoftálica em solução de estireno AROPOL IS 4633 com o catalizador PEROXAN ME-50 LS-P10 nas proporções de 100 g de resina para 10 g de catalizador;
- colocação de barreiras de aço de 3.9 mm (vidro/epóxido) ou 3.0 mm (vidro/poliéster) a delimitar as dimensões finais do laminado, aproximadamente 260×260 mm² (figura 2.1); entre as barreiras criaram-se pequenas folgas para permitir o fluxo lateral do excesso de resina;
- laminagem das camadas (figuras 2.2c a 2.2f), isto é, aplicação de uma camada de resina na base do molde ou no topo do laminado já efectuado, colocação de uma camada de tecido e sua impregnação com um pincel até atingir a espessura final; no caso das placas de vidro(UD)/poliéster recorreu-se também a um rolo de PTFE com ranhuras para prensar as camadas e reduzir a quantidade de vazios;
- colocação da placa-molde superior (figura 2.2j) previamente desgordurada e com desmoldante, ou intercalar um filme desmoldante (figura 2.2g a 2.2i); aplicou-se posteriormente

um peso sobre a placa molde superior e deixou-se curar os laminados durante 4 horas à temperatura ambiente;

- pós-cura de 6 horas a 60 °C para as placas vidro(WF)/epóxico, conforme a ficha técnica do fornecedor da resina.

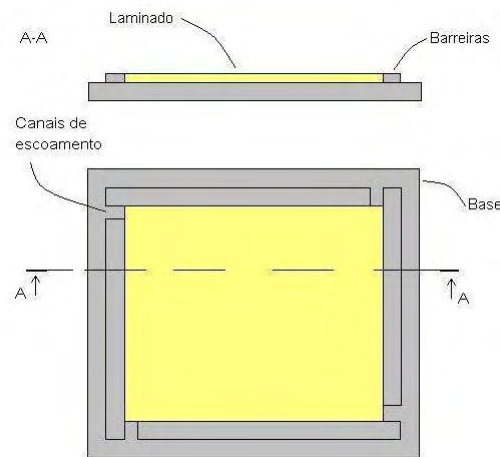


Figura 2.1: Esquema representativo do molde utilizado para o fabrico dos laminados.

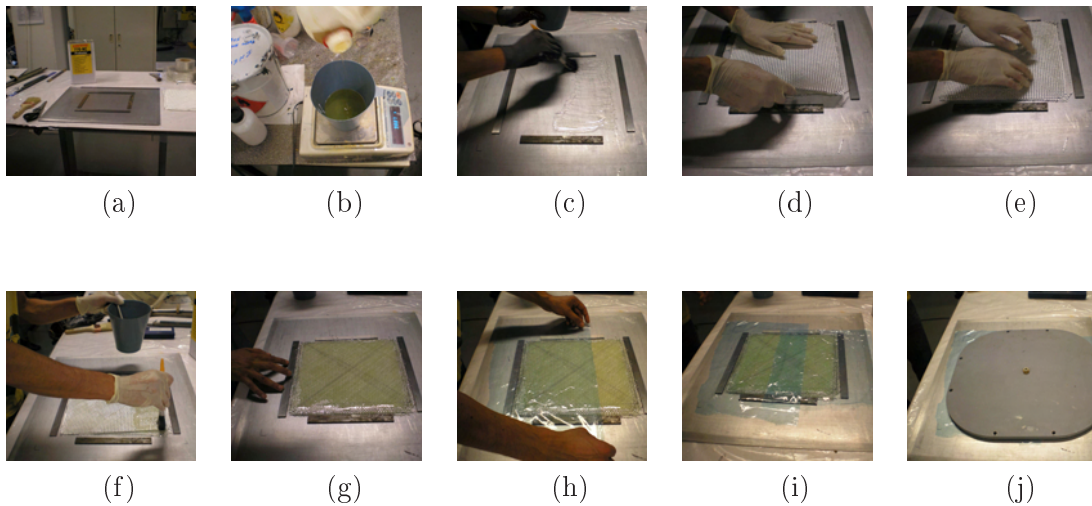


Figura 2.2: Representação dos vários passos no processo de moldação manual.

Note-se que, apesar do processo usado ter sido moldação manual, tratou-se efectivamente de um processo de ‘molde fechado’. Isto permitiu o controlo da espessura e, consequentemente, do teor de fibra do laminado graças às barreiras, bem como a obtenção de duas faces planas. Por conseguinte, as placas obtidas não são exactamente representativas das peças normalmente

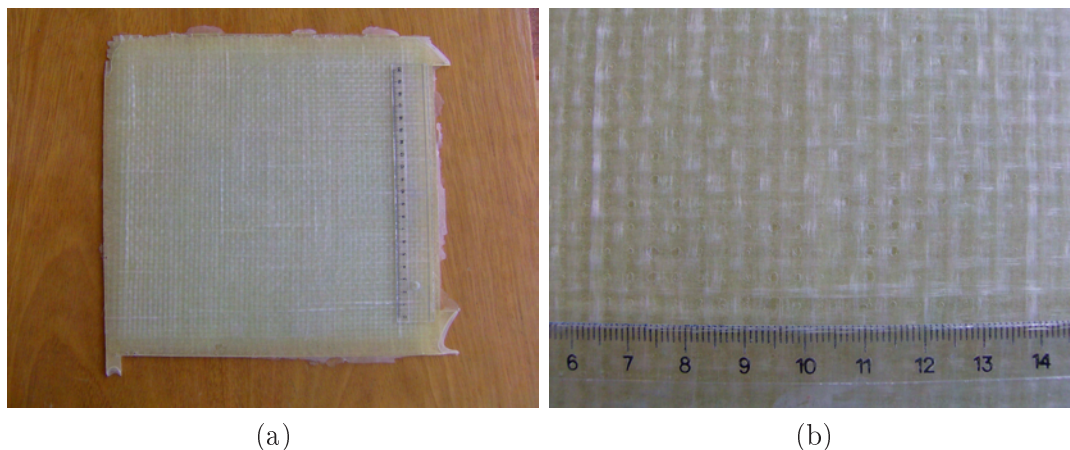


Figura 2.3: Laminado vidro(WF)/epóxico depois de desmoldado: (a) Vista geral (b) Ampliação.

produzidas por moldação manual, que se caracterizam por ter uma face de fraco acabamento superficial. Não obstante, as placas de vidro(UD)/poliéster apresentaram algumas irregularidades na superfície superior, que se deveram à ausência da camada exterior de manta e à contracção da resina.

Os provetes foram depois obtidos das placas através de corte por jacto de água. Nos provetes para os ensaios de tracção, colaram-se ainda insertos com dimensões $50 \times 15 \times 2 \text{ mm}^3$ em alumínio para aperto dos mordentes. Quanto aos ensaios de compressão, adoptou-se uma metodologia diferente da preconizada nas várias normas existentes, face aos problemas que subsistem. O objectivo principal deste novo método era o de conseguir um estado de tensão uniforme num volume apreciável do provete, evitando a ruptura prematura do provete por encurvadura. Para tal, a carga foi aplicada nos topos de provetes com 30 mm de comprimento, reforçados nos dois lados por camadas de *Araldit standard*, cujo papel principal era evitar encurvadura prematura (figura 2.4). A espessura total do provete ficou pelos 10 mm. Notar que a *Araldit standard* serviu também para colar os topos de alumínio, com os quais se procurou evitar o esmagamento local do compósito. A preparação dos provetes foi feita num molde em madeira com chapas de alumínio para vazamento da *Araldit standard* (figura 2.5).

A tabela 2.2 e a figura 2.6 contêm a nomenclatura e dimensões nominais adoptadas para os vários tipos de provetes. Apenas as espessuras dos provetes foram significativamente maiores do que os valores recomendados pelas normas, opção que foi tomada para garantir um número de camadas de reforço mais próximo do que é usado nos laminados para aplicações navais. As maiores espessuras resultaram também da elevada densidade superficial dos tecidos. Quanto às restantes dimensões, foram ligeiramente menores do que as definidas nas normas por questões de economia de material.

Por conveniência, os provetes serão designados conforme o exemplo da figura 2.7. A designação inclui 4 parâmetros. O primeiro designa o tipo de tecido, que pode ser WF de *woven fabric* ou UD de unidireccional. O segundo parâmetro corresponde aos ângulos de orientação

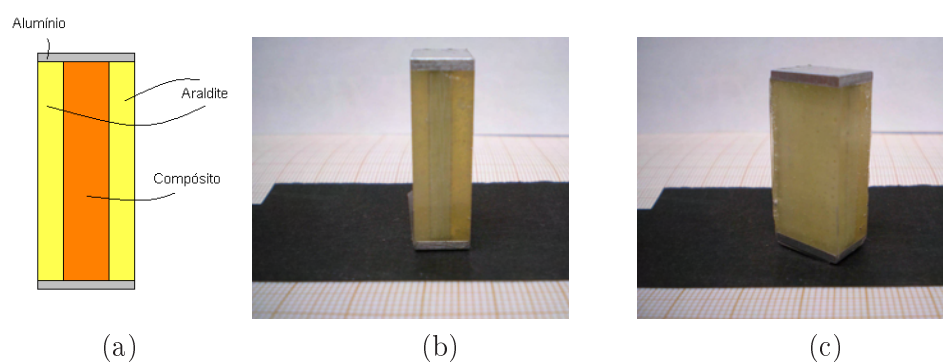


Figura 2.4: Provetes para ensaios de compressão:(a) representação esquemática, (b) vista lateral e (c) vista oblíqua.

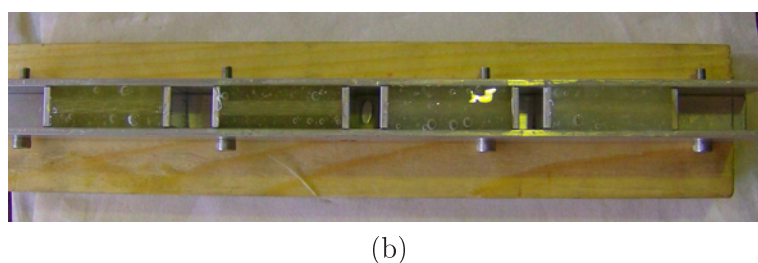
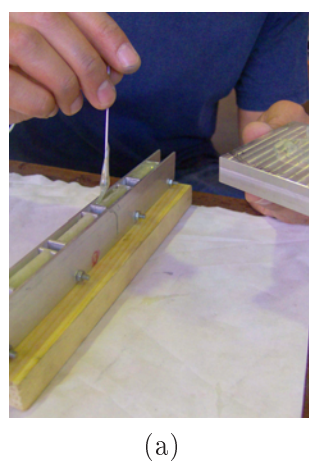


Figura 2.5: Fotografias do molde utilizado para produzir os provetes para os ensaios de compressão:(a) adição da *Araldit* e (b) resultado final.

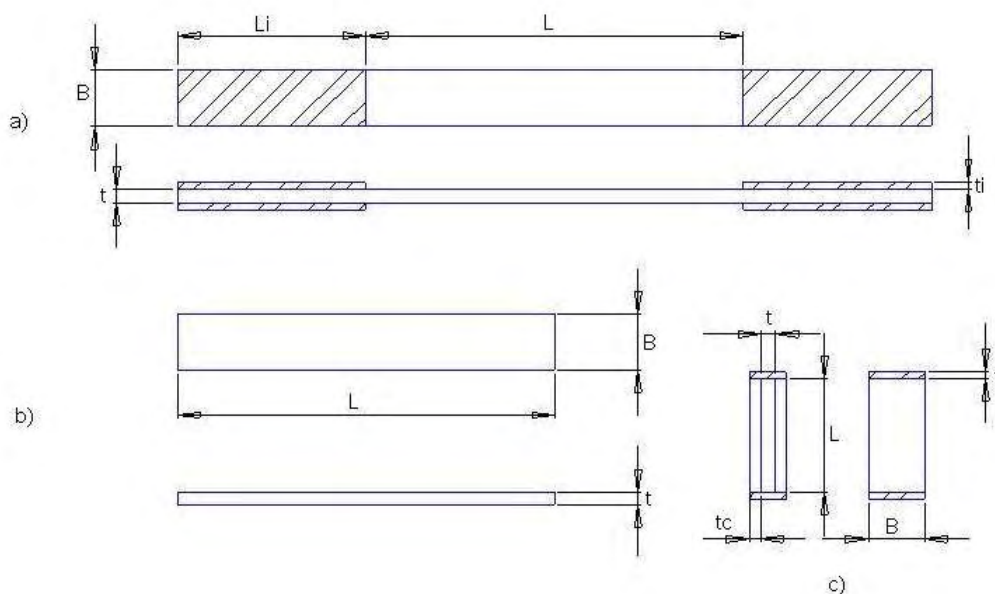


Figura 2.6: Representação esquemática dos provetes e da nomenclatura utilizada para as dimensões de cada um: a) provetes de tracção e corte, b) provetes de flexão e c) provetes de compressão.

Tabela 2.2: Resumo das dimensões nominais dos provetes ensaiados. Todas as dimensões estão em milímetros.

Provette	L	L_i	B	t	t_i	t_c
WF0T	200	50	15	3.9	2	—
WF0C	30	—	15	3.9	—	3
WF45C	30	—	20	3.9	—	3
WF45T	190	50	20	3.9	2	—
WF0F	100	—	15	3.9	—	—
WF45F	110	—	20	3.9	—	—
UD0T	200	50	15	3	2	—
UD90T	140	20	20	3	2	—
UD0C	30	—	20	3	—	3
UD90C	30	—	20	3	—	—
UD45C	30	—	20	3	—	3
UD45T	190	50	20	3	2	—
UD45F	110	—	20	3	—	—
UD0F	94	—	15	3	—	—

das camadas: 0° , 45° e 90° para laminados dos tipos $[0]_n$, $[\pm 45]_n$ e $[90]_n$, respectivamente. O terceiro parâmetro diz respeito ao tipo de ensaio: tracção (T), compressão (C) e flexão (F). Finalmente, o último parâmetro designa o número do provete. Assim, no exemplo da figura 2.7 faz-se referência ao provete nº2 do laminado do tipo $[\pm 45]_n$ de vidro(WF)/epóxico, sujeito a ensaio de tracção.

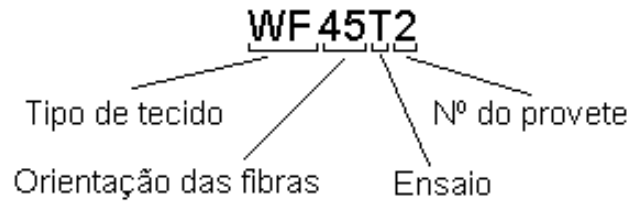


Figura 2.7: Exemplo do código utilizado na identificação dos provetes.

2.2 Ensaaios

Os ensaios foram realizados na máquina Shimadzu AG-50KNG do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Usou-se uma célula de carga de 50 kN de capacidade nos ensaios de tracção, compressão e corte, e uma célula de carga de 5 kN para os ensaios de flexão. As velocidades de deslocamento do travessão foram de 1 mm/min para a compressão e 2 mm/min para todos os outros ensaios. Ensaaiaram-se pelo menos 5 provetes de cada tipo.

A medição dos deslocamentos foi feita com um videoextensómetro Messphysic e respectivo *software* específico para cada tipo de ensaio. Nos ensaios de tracção, corte e compressão mediu-se o deslocamento relativo entre as marcas de referência previamente coladas. O comprimento livre utilizado nos primeiros para medição do deslocamento axial foi de 80 mm, deixando-se assim 10 mm de distância entre os insertos e as marcas (figura 2.8). a norma BS 2782 requer que os provetes que sofram ruptura entre as marcas e os insertos sejam rejeitados [7].

Por seu turno, nos ensaios de flexão em 4 pontos, a montagem foi iluminada pela retaguarda e mediu-se o deslocamento da zona inferior do provete relativamente ao plano superior do suporte dos roletes de apoio (figura 2.9). As dimensões utilizadas neste trabalho (figura 1.9b) foram: distância entre apoios $L=80$ mm e distância entre os roletes de transmissão de carga $L_s=30$ mm.

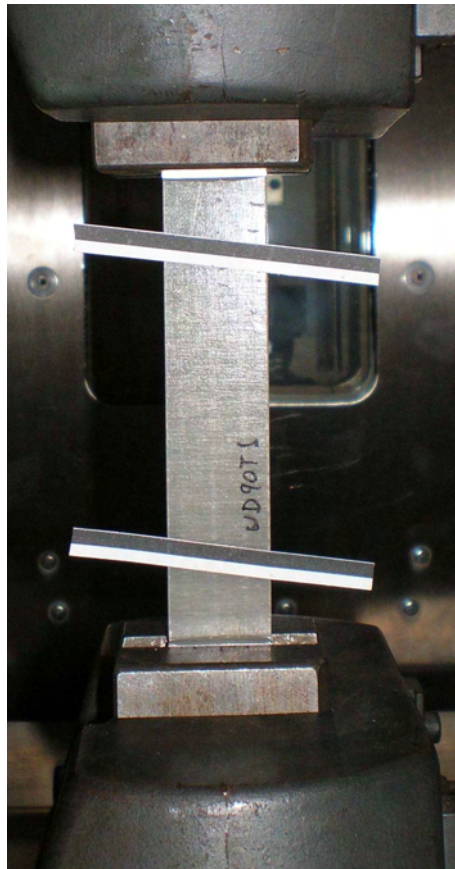
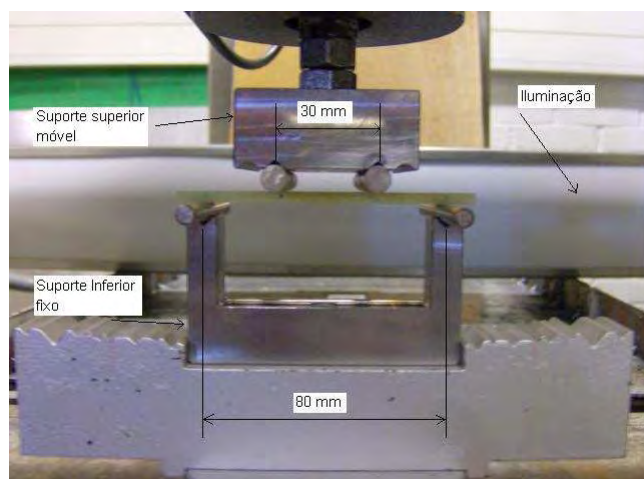
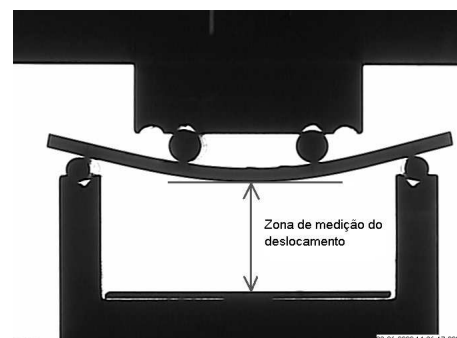


Figura 2.8: Fotografia de um ensaio de tracção.



(a)



(b)

Figura 2.9: Montagem do ensaio de flexão: (a) fotografia da montagem e (b) imagem representativa da zona de medição do deslocamento vertical do provete.

2.3 Tratamento de Dados

2.3.1 Ensaios de tracção

Um dos objectivos principais dos ensaios de tracção é medir o módulo de Young, que pode ser calculado de 3 formas a partir das curvas tensão-deformação experimentais:

- usar uma recta tangente à parte inicial da curva;
- criar uma recta tangente numa deformação específica;
- usar uma secante de aproximação entre duas deformações pré-definidas, método que foi adoptado neste trabalho.

Os valores limite de deformação foram 0.05 % e 0.25 %. Por seu turno, as tensões de ruptura correspondem ao máximo da tensão atingida.

Infelizmente, não foi possível obter medições fiáveis da deformação transversal, pelo que não são apresentados valores do coeficiente de Poisson, ν_{12} . Pensa-se que isto se deveu ao facto do comprimento de medida longitudinal (80 mm) ter sido muito maior do que o comprimento de medida transversal, limitado pela largura relativamente pequena (15 mm) dos provetes de tracção longitudinal.

2.3.2 Ensaios de corte via tracção

Como se viu em 1.4.3, este ensaio dito de corte é, na realidade, um ensaio de tracção de provetes $[\pm 45]_n$ no qual é necessário medir as deformações axial ϵ_x e transversal ϵ_y . A deformação e a tensão de corte nas camadas são então

$$\gamma_{12} = \epsilon_x - \epsilon_y \quad (2.2)$$

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_x}{2} \quad (2.3)$$

com base nas quais se pode obter o módulo de corte G_{12} nos mesmos moldes de 2.3.1. Porém, face ao processo de dano que o provete sofre durante um campo apreciável de deformações, a tensão de ruptura foi definida à deformação de 5 % (BS EN ISO 14,129) como se exemplifica na figura 2.10.

2.3.3 Ensaios de compressão

Conforme esperado, verificou-se a existência de uma zona inicial de acomodação de carga no provete (figura 2.11a), que se deveu muito provavelmente a pequenos desvios da perpendicularidade e à natureza multi-material do provete. Para efeitos de análise, os dados desta zona foram rejeitados e substituídos pela extrapolação de uma recta de regressão linear dos dados subsequentes. Note-se que, tendo o provete dois materiais distintos - o compósito em estudo e

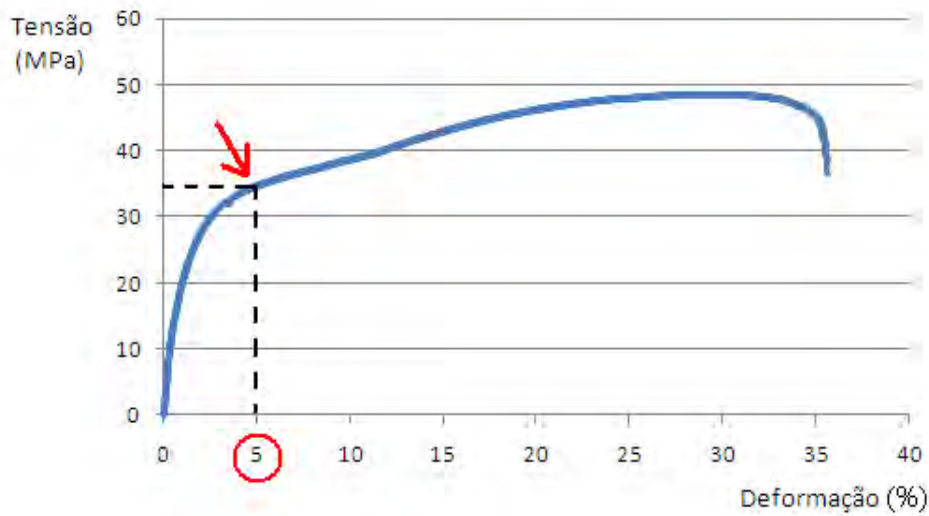


Figura 2.10: Exemplo de curva tensão-deformação ao corte.

as camadas laterais de *Araldit* - era necessário subtrair à tensão do provetes a contribuição das camadas de *Araldit*. Usou-se para tal uma lei das misturas,

$$\sigma_{composito} = \frac{\sigma_{proвете} - (1 - \nu_{composito})\sigma_{Araldit}}{\nu_{composito}} \quad (2.4)$$

através da fracção volúmica de compósito e da tensão na *Araldit*. A curva tensão-deformação à compressão desta foi medida num projecto de Dissertação a decorrer no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

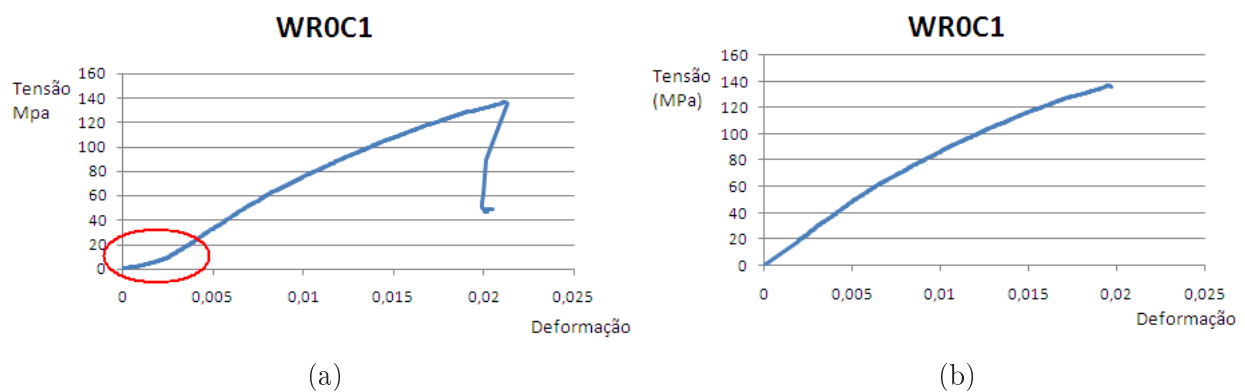


Figura 2.11: Comparação entre as curvas tensão-deformação à compressão:(a) curva real e (b) curva após o tratamento de dados acima descrito.

2.3.4 Ensaio de flexão

O módulo de flexão E_f e a tensão de ruptura σ_{uf} foram calculados a partir da Teoria das Vigas, desprezando o efeito do corte transversal. As equações para o ensaio de flexão em 4 pontos são, respectivamente:

$$E_f = \frac{am}{4bh^3}(4a^2 - 3L^2) \quad (2.5)$$

$$\sigma_{uf} = \frac{6P_u a}{bh^2} \quad (2.6)$$

sendo m o declive da zona inicial da curva carga - deslocamento experimental (δ), $a = (L - L_s)/2$ (figura 1.9b) e P_u a carga de ruptura. Esta foi tomada como a carga do primeiro pico quando os provetes apresentavam um processo de danificação significativo posterior, como se exemplifica na figura 2.12. De facto, embora nesta fase se possam atingir cargas superiores, a equação 2.6 já não é aplicável.

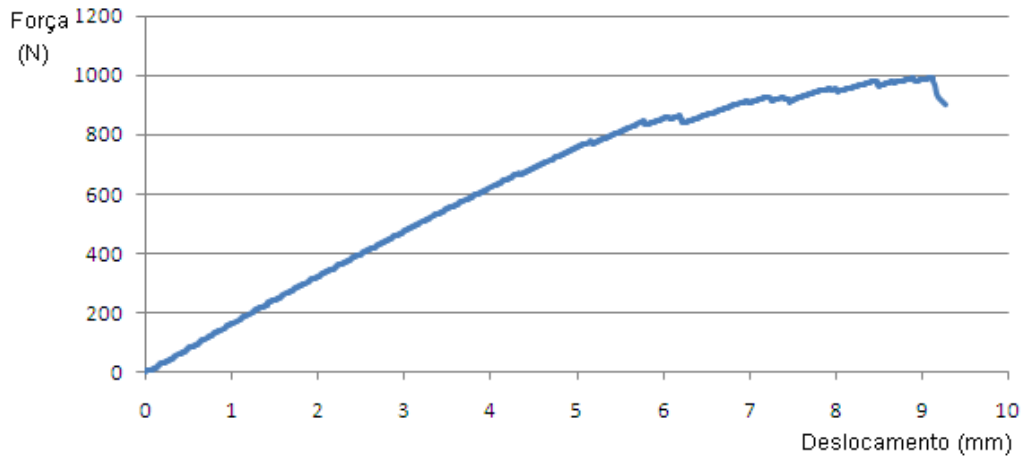


Figura 2.12: Curva força–deslocamento do provete WF0F3.

Capítulo 3

Resultados experimentais dos provetes vidro(WF)/epóxico

3.1 Ensaios de tracção

A figura 3.1 apresenta as 5 curvas tensão-deformação medidas em provetes [0]₇. Para facilitar a visualização, as curvas têm uma translação horizontal relativa de 0.2%. As referidas curvas evidenciam o início de perda de rigidez significativa algo antes dos 100 MPa. A curva do provete WF0T5 apresenta oscilações que se devem a erros de medição do videoextensómetro. A tabela 3.1 resume os resultados principais, isto é, a tensão e a deformação de ruptura e o módulo de Young longitudinais. Apresenta também o coeficiente de correlação da regressão linear usada para calcular o módulo, e a zona do provete em que ocorreu a ruptura. De salientar a baixíssima dispersão estatística nos resultados, o que é algo surpreendente face ao processo de fabrico manual usado. Para isso contribuiu seguramente a utilização de molde fechado para o controlo da espessura das placas. Como o tecido usado é equilibrado, o compósito apresenta as mesmas propriedades nas direcções longitudinal e transversal, isto é, $\sigma_{ut1} = \sigma_{ut2}$ e $E_1 = E_2$.

Apresentam-se ainda fotografias dos provetes após ruptura, bem como uma ampliação da zona de ruptura de três desses provetes (figuras 3.2 e 3.3). É de salientar que todos os provetes sofreram ruptura na zona que distava pelo menos 10 mm dos insertos, conforme desejável, à excepção do provete WF0T5. A ruptura deste provete deverá ter sido influenciada por um excesso de força de aperto das amarras. Os resultados para o provete WF0T5 foram portanto excluídos.

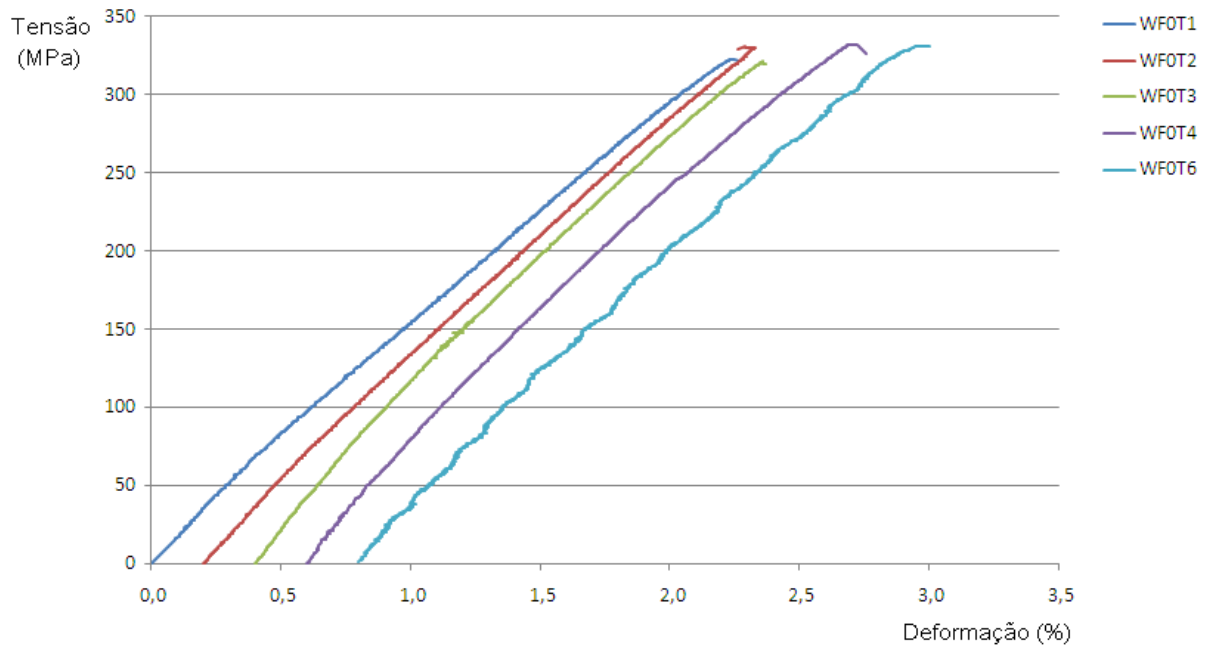


Figura 3.1: Curvas tensão-deformação de 5 provetes vidro(WF)/epóxico à tracção longitudinal. Cada curva está deslocada horizontalmente de 0.2% em relação à anterior.

Tabela 3.1: Resultados dos ensaios de tracção dos provetes vidro(WF)/epóxico à tracção longitudinal.

Provetes WF0T	σ_{ut1} (MPa)	ε_{ut1} (%)	E_1 (GPa)	Coefficiente correlação	Ruptura
1	322.450	2.1368	17.058	0.9985	zona inferior a 20 mm do inserto
2	330.383	2.1285	18.442	0.9993	zona inferior a 20 mm do inserto
3	321.331	1.9582	18.922	0.9990	zona superior a 35 mm do inserto
4	332.252	2.0946	17.996	0.9996	zona superior a 30 mm do inserto
5	—	—	—	—	zona superior junto ao inserto
6	328.761	2.1210	17.062	0.9959	zona superior a 48 mm do inserto
Média	327.035	2.0878	17.896		
D. Padrão (%)	1.49	3.55	4.64		

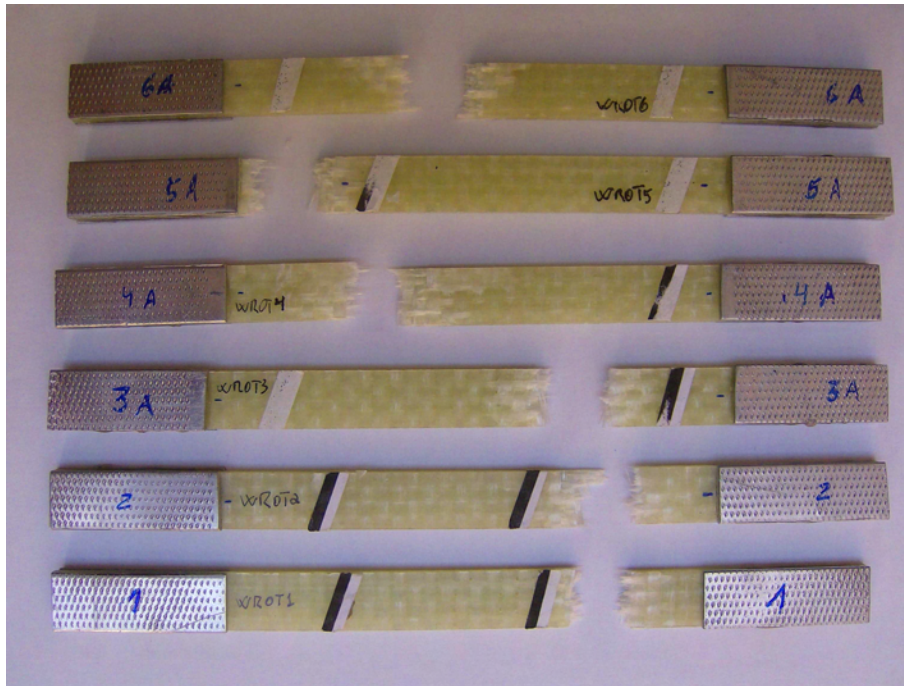


Figura 3.2: Fotografia dos provetes WF0T após os ensaios de tracção.

3.2 Ensaios de corte via tracção

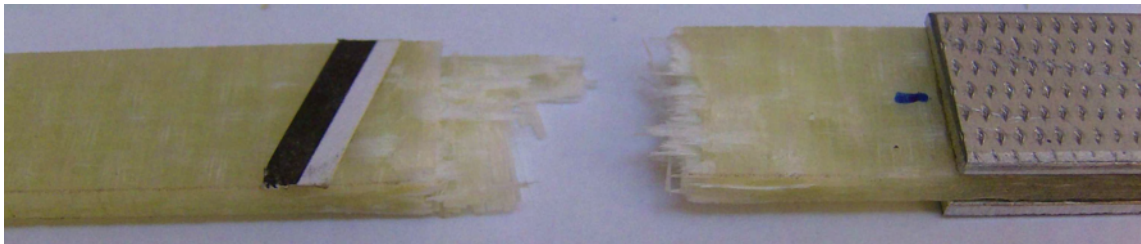
Na figura 3.4 estão representadas as 5 curvas obtidas nos ensaios de corte via tracção realizados nos provetes $[(\pm 45)_3/45]$. Estas curvas apresentam três zonas principais. A primeira, de comportamento linear, onde foi definido o módulo de corte G_{12} . A segunda zona caracteriza-se por uma perda gradual de rigidez até à formação de um ‘cotovelo’. Na terceira zona há dano gradual com aumento da tensão. Isto deve-se à delaminação entre camadas e ao consequente alinhamento destas na direcção de carga. A tabela 3.2 resume os resultados experimentais obtidos nos mesmos moldes dos da tabela 3.1. A dispersão é algo maior, sobretudo no módulo de corte, dado que a zona linear é muito mais limitada. A figura 3.5 mostra fotografias dos provetes após os ensaios, enquanto a figura 3.6 revela as zonas onde se deu a ruptura dos provetes cujo ensaio foi levado até à fractura. Nas zonas danificadas os feixes de fibras tornam-se mais visíveis.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3: Fotografias ampliadas de três provetes WF0T:(a) ruptura junto ao inserto do provete WF0T5, (b) e (c) ruptura dos provetes WF0T4 e WF0T2, respectivamente.

Tabela 3.2: Resultados dos ensaios de corte dos provetes WF45T.

Provetes WF45T	τ_{u12} (MPa)	γ_{u12} (%)	G_{12} (GPa)	Coefficiente correlacção	E_x (GPa)	Ruptura
1	34.720	5.00	2.741	0.9914	8.232	centro do provete
2	36.271	5.00	2.654	0.9965	8.352	centro do provete
3	34.401	5.00	2.294	0.9979	7.593	não atingiu a ruptura
4	33.837	5.00	2.413	0.9880	7.785	não atingiu a ruptura
5	33.727	5.00	2.133	0.9946	6.884	a 25 cm do inserto
Média	34.591	—	2.447	—	7.769	
D. Padrão (%)	2.96	—	10.27	—	7.53	

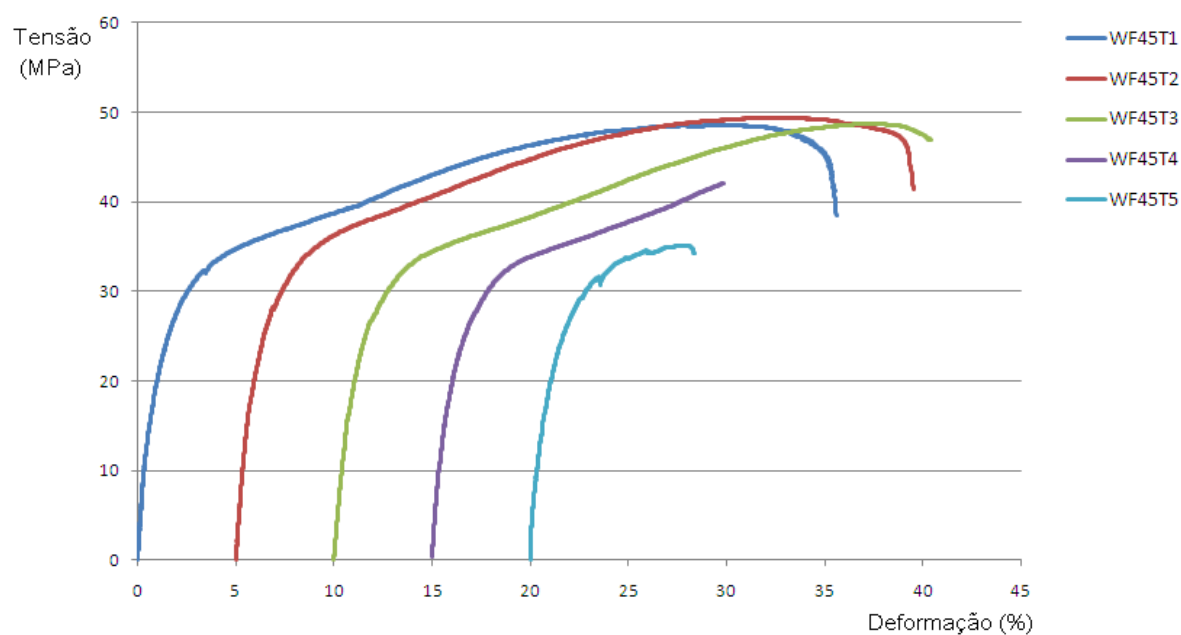


Figura 3.4: Curvas tensão-deformação dos 5 provetes vidro(WF)/epóxico ensaiados ao corte. Para facilitar a visualização, cada curva está deslocada horizontalmente em 5% em relação à anterior.



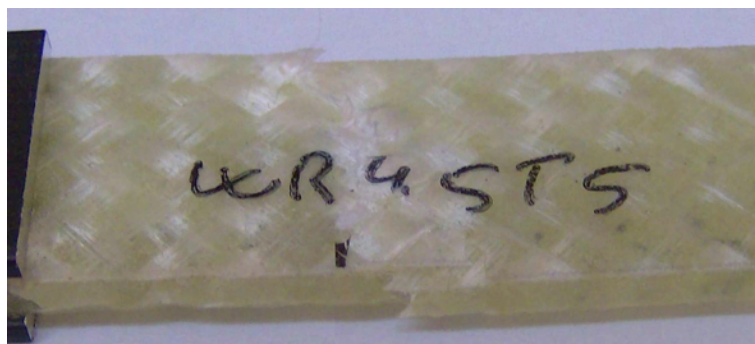
Figura 3.5: Fotografia dos provetes WF45T após os ensaios de corte.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6: Fotografias ampliadas de três provetes: (a) WF45T1, (b) WF45T2 e (c) WF45T5.

3.3 Ensaios de compressão

As curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão de provetes [0]₇ estão representados na figura 3.7. Elas são bastante não-lineares, sobretudo devido ao comportamento não-linear da *Araldite*. Apesar disso, o módulo de Young (tabela 3.3) é praticamente igual ao medido em ensaios de tracção (ver 3.1), o que reforça a confiança no ensaio de compressão. A tensão de ruptura também ficou bastante próxima da tensão de ruptura à tracção. Naturalmente, a dispersão estatística aumentou, mas dentro de valores aceitáveis.

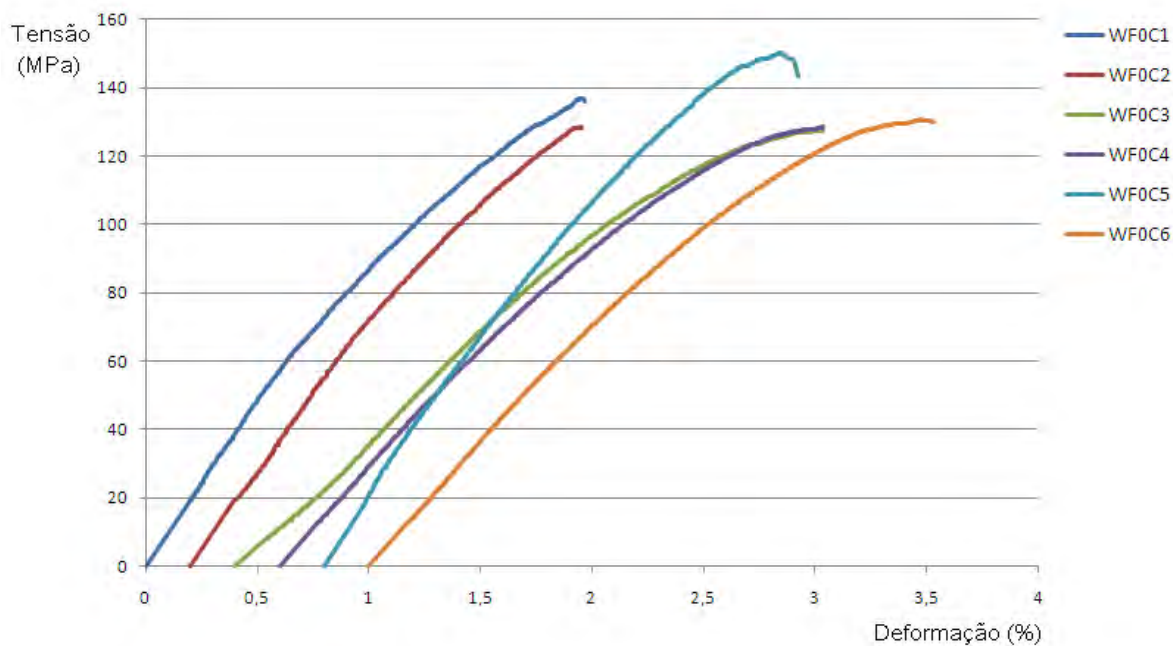


Figura 3.7: Curvas tensão-deformação dos 6 provetes vidro(WF)/epóxico ensaiados à compressão longitudinal. Para facilitar a visualização, cada curva está deslocada horizontalmente de 0.2% em relação à anterior.

Na figura 3.8 nota-se uma zona mais clara nos bordos dos provetes, onde se deu a ruptura. Para melhor clareza ampliaram-se fotografias de três provetes na figura 3.9 e fez-se ainda uma ampliação maior da zona de ruptura do provete WF0C2 na figura 3.10. Verifica-se que se evitou a encurvadura, que é um dos grandes problemas nos ensaios à compressão. Além disso, a linha de ruptura é algo inclinada, o que é típico das ‘*kink-bands*’ observadas nos ensaios de compressão [1].

Tabela 3.3: Resultados dos ensaios de compressão dos provetes WF0C.

Provetes WF0C	σ_{uc1} (MPa)	ε_{uc1} (%)	E_1 (GPa)	Coeficiente correlacção
1	293.470	1.9559	21.878	0.9996
2	274.144	1.7779	20.776	0.9996
3	256.936	2.5526	14.718	0.9999
4	257.335	2.8093	16.159	0.9999
5	328.585	1.8976	19.644	0.9999
6	256.880	2.8329	16.207	0.9999
Média	277.892	2.3044	18.230	
D. Padrão (%)	10.34	20.90	15.99	

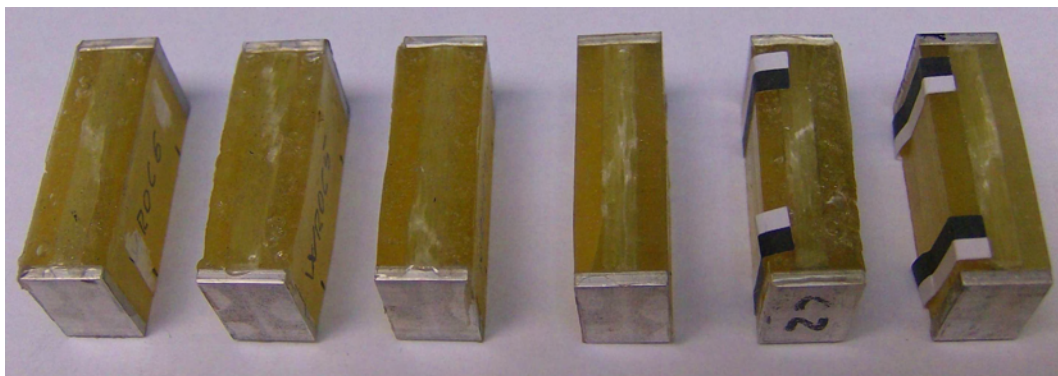


Figura 3.8: Fotografia dos provetes WF0C após os ensaios de compressão. Da direita para esquerda, WF0C1 até WF0C6.

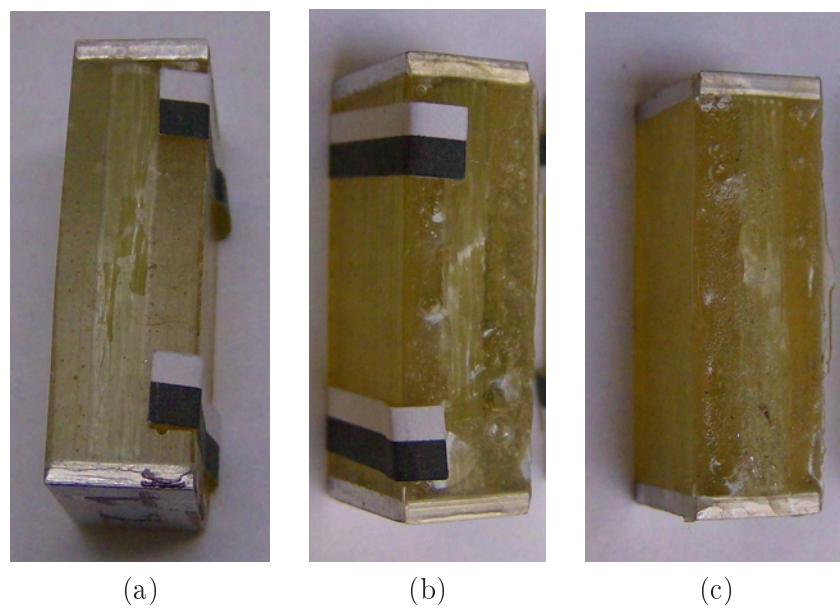


Figura 3.9: Fotografias ampliadas dos provetes (a) WFOC1, (b) WFOC2 e (c) WFOC6.



Figura 3.10: Fotografia da zona de ruptura do provete WFOC2.

3.4 Ensaios de corte via compressão

Foram também ensaiados à compressão provetes $[(\pm 45)_3/45]$, cujas curvas tensão-deformação são apresentadas na figura 3.11. Observa-se que estas têm uma zona inicial linear bastante limitada, começando a perder rigidez de forma acentuada a partir de 40 MPa, aproximadamente. Isto deve-se a plastificação, fissuração e delaminação. Porém, ao contrário do que sucede no ensaio de corte via tracção, as camadas tendem a orientar-se perpendicularmente às axiais forças exercidas, pelo que a carga não aumenta. A tabela 3.4 resume os resultados obtidos para a tensão

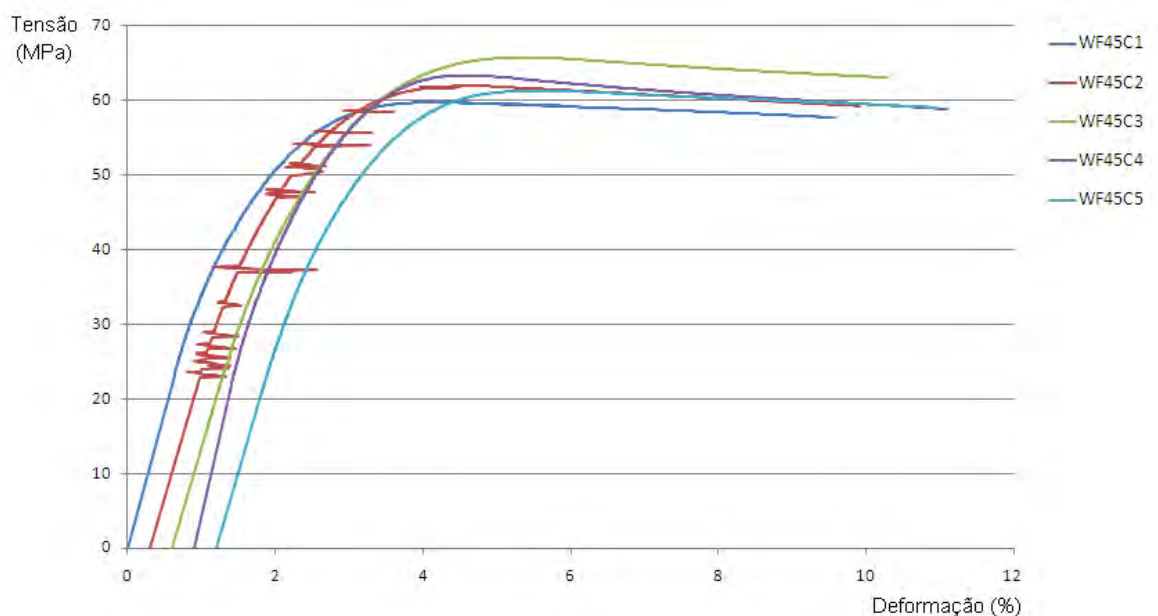


Figura 3.11: Curvas tensão-deformação dos 5 provetes vidro(WF)/epóxico ensaiados ao corte via compressão. Cada curva está deslocada horizontalmente de 0.3% em relação à anterior.

de ruptura ao corte e para as deformações axiais de ruptura e módulo axial, pois neste ensaio não foi medida a deformação transversal. Estes valores são algo inferiores aos medidos no ensaio de corte via tracção (ver 3.2). Isto deve-se às zonas lineares serem bastante limitadas e à maior contribuição das camadas de *Araldite* para a tensão do provete do que nos provetes WF0C.

A figura 3.12 mostra fotografias dos provetes pós-ensaio. Exceptuando o provete WF45C1, que apresenta embarrilamento por ter sido prolongado o seu ensaio, não se observa claramente qualquer dano do provete nos bordos. Seriam por isso necessários métodos de inspecção mais sofisticados como a radiografia-X ou os ultrassons para avaliar o dano interno.

Tabela 3.4: Resultados dos ensaios de corte via compressão dos provetes WF45C.

Provetes WF45C	τ_{u12} (MPa)	ε_x (%)	E_x (GPa)	Coefficiente correlacção
1	31.825	4.0867	6.206	0.9998
2	33.995	4.1697	5.625	0.9998
3	38.234	4.6595	5.593	0.9999
4	38.748	3.5755	8.558	0.9981
5	33.592	4.1248	5.665	0.9996
Média	35.279	4.1232	6.329	—
D. Padrão (%)	8.64	9.32	20.08	—

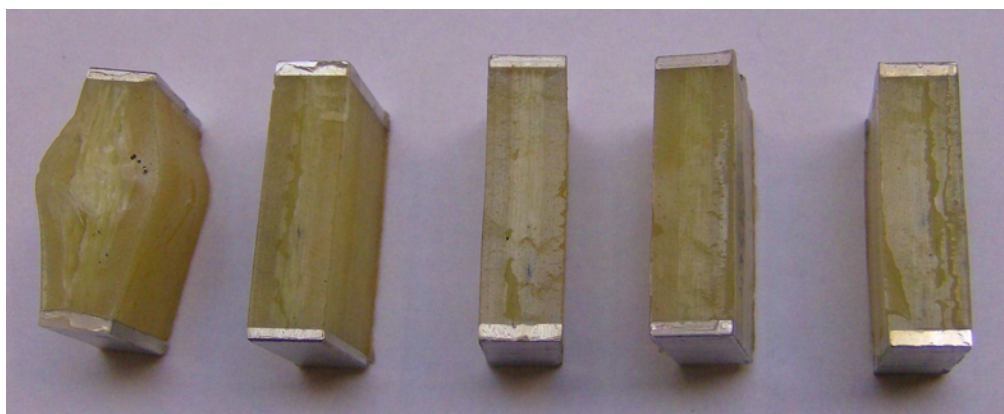


Figura 3.12: Fotografia dos provetes WF45C1 a WF45C5 após os ensaios de corte via compressão.

3.5 Ensaio de flexão

A figura 3.13 apresenta as curvas carga-deslocamento(δ)/distância entre apoios externos(L) (figura 1.9b) obtidas experimentalmente dos ensaios de flexão realizados nos provetes [0]₇. Constatou-se a existência de uma ampla zona inicial, seguida de danificação gradual a carga ligeiramente maior do que a do primeiro pico. A tabela 3.5 resume os resultados obtidos nestes

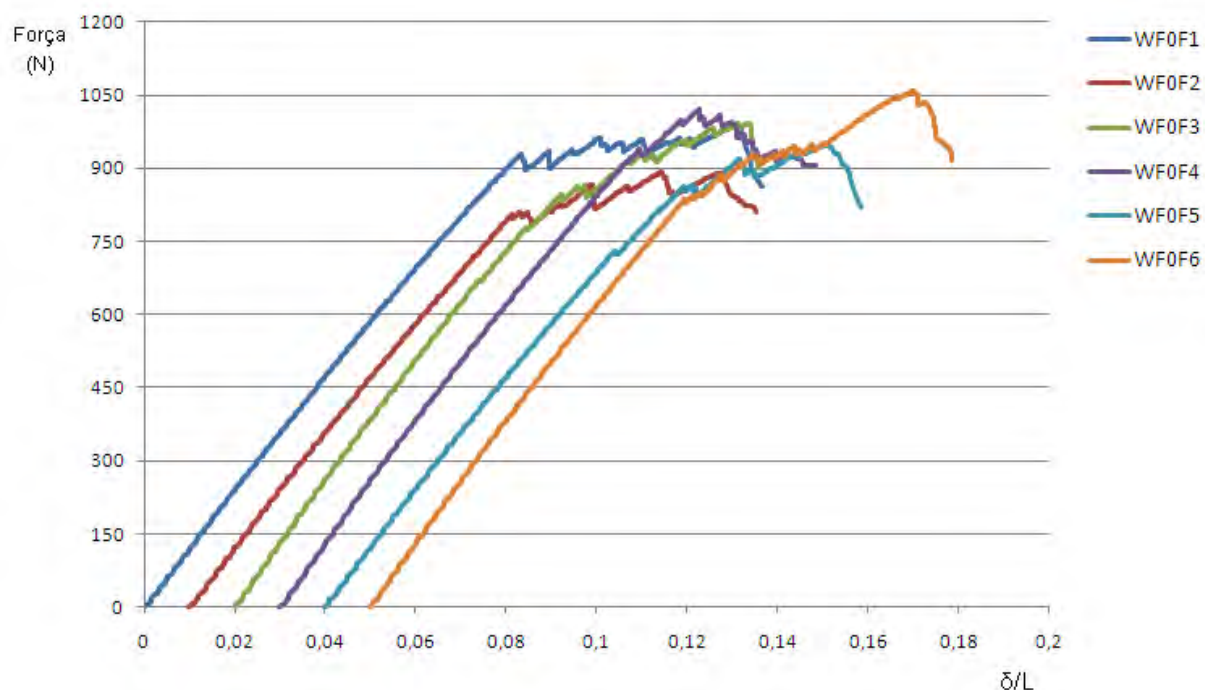


Figura 3.13: Curvas carga-deslocamento/vão dos 6 provetes vidro(WF)/epóxico à flexão longitudinal. Cada curva está deslocada horizontalmente de 0.01 em relação à anterior.

ensaio, onde se verifica que o módulo está em boa concordância com os valores medidos nos ensaios de tracção (3.1) e de compressão (3.3) longitudinal, enquanto que a ruptura está mais próxima da tensão de ruptura longitudinal à compressão. Note-se que o rácio δ/L até ao primeiro pico foi sempre inferior a 0.1, não sendo por isso necessário utilizar factores de correcção para os valores da tensão obtidos [7].

De facto, durante os ensaios mecânicos observou-se que a ruptura se iniciou na superfície superior dos provetes, ou seja, por compressão, seguida de encurvadura local com delaminação (figuras 3.14 a 3.16). Depois ocorreu naturalmente a ruptura à tracção na superfície inferior.

Por fim, apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios de flexão $[(\pm 45)_3/45]$. As curvas carga- δ/L da figura 3.17 diferem substancialmente das dos provetes WF0F, desde logo pela menor zona linear antes do primeiro pico de carga. O processo de dano não tem agora oscilações de carga, dado que envolve sobretudo plastificação, fissuras transversais e delaminações em vez de rupturas das fibras. Constatam-se também as elevadas deformações atingidas, na medida

Tabela 3.5: Resultados dos ensaios de flexão dos provetes WF0F.

Provetes WF0F	δ (mm)	δ/L (%)	σ_{uf1} (MPa)	E_{f1} (GPa)	Coefficiente correlação	Modo Ruptura
1	6.90	8.63	307.440	17.953	0.9999	ruptura por compressão
2	5.70	7.12	274.912	18.851	0.9998	"
3	5.64	7.06	277.839	19.015	0.9998	"
4	6.41	8.01	309.519	19.185	0.9998	"
5	6.51	8.13	291.345	18.431	0.9998	"
6	6.20	7.75	288.975	18.732	0.9999	"
Média	6.23	—	291.672	18.695	—	
D. Padrão (%)	7.82	—	4.96	2.38	—	



Figura 3.14: Imagem retirada do videoextensômetro que evidencia o início de encurvadura localizada na superfície que está sujeita à compressão.

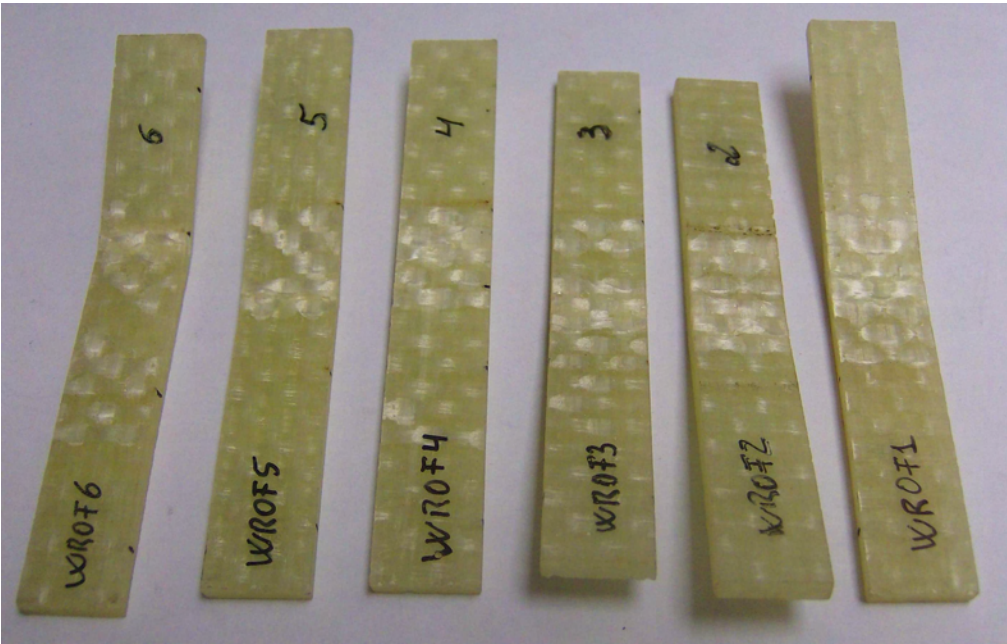


Figura 3.15: Fotografia dos provetes WF0F após os ensaios de flexão.



(a)



(b)

Figura 3.16: Fotografias ampliadas da zona de ruptura do provete WF0F1: (a) vista da superfície superior sujeita a tensões de compressão e (b) vista da superfície inferior sujeita a tensões de tracção.

em que os ensaios foram todos terminados sem ruptura dos provetes. Além disso, a relação δ/L foi superior excedendo 0.1, mesmo antes do primeiro pico, o que nos levaria a utilizar factores de correcção na tensão de ruptura [ASTM D790, BSI 2782, ISO-14125]. Não obstante, optou-se por não corrigir os valores obtidos já que as correcções não seriam significativas. Na tabela 3.6 resumem-se os resultados destes ensaios. Para além da reduzida dispersão nos resultados, verifica-se que a resistência à flexão é consideravelmente superior às resistências axiais medidas nos ensaios de corte via tracção (3.2) e compressão (3.4), cujos valores médios foram $\sigma_{ux}=2\tau_{u12}=69.2$ MPa e 70.0 MPa, respectivamente. Mais uma vez, o dano começou na superfície superior, onde as tensões axiais são de compressão (figuras 3.18 e 3.19).

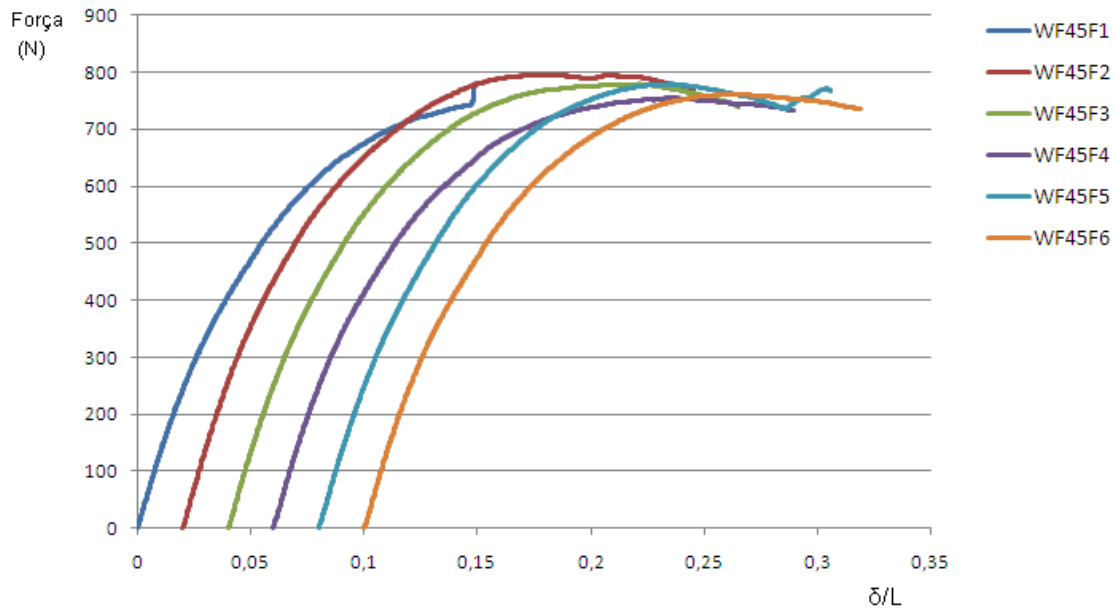


Figura 3.17: Curvas carga–deslocamento/vão dos 6 provetes WF45F à flexão. Cada curva está deslocada horizontalmente de 0.02 em relação à anterior.

Tabela 3.6: Resultados dos ensaios de flexão dos provetes WF45F.

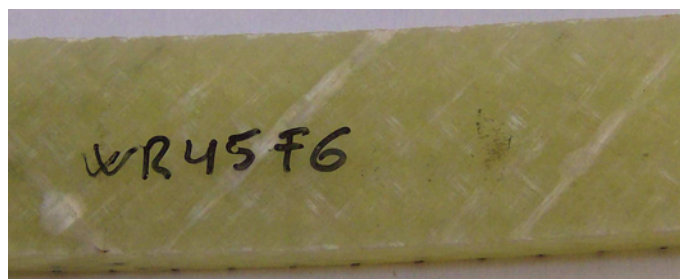
Provetes WF45F	δ (mm)	δ/L (%)	σ_{ufx} (MPa)	E_{fx} (GPa)	Coefficiente correlacção
1	11.75	14.68	128.815	8.594	0.9999
2	12.28	15.35	135.749	8.854	0.9994
3	11.43	14.29	129.062	8.143	0.9996
4	13.87	17.34	129.626	8.376	0.9992
5	11.73	14.66	131.736	8.174	0.9996
6	12.57	15.71	134.113	9.039	0.9994
Média	12.27	—	131.517	8.530	—
D. Padrão (%)	7.21	—	2.19	4.29	—



Figura 3.18: Fotografia dos provetes WF45F após os ensaios de flexão.



(a)



(b)

Figura 3.19: Fotografias ampliadas dos provetes (a) WF45F3 e (b) WF45F6.

3.6 Conclusões relativas aos laminados vidro(WF)/epóxico

Dos resultados dos ensaios experimentais acima descritos, destacam-se desde logo duas conclusões importantes:

- a baixa dispersão estatística nas grandezas medidas, o que confirma o rigor tido nos procedimentos de preparação das amostras e nos ensaios;
- os bons resultados obtidos com o novo método de ensaio à compressão utilizado.

As tabelas 3.7 e 3.8 resumem os valores médios das propriedades medidas nos ensaios realizados, que permitem as seguintes conclusões específicas:

- a boa concordância entre os valores do módulo longitudinal E_1 obtido nos vários ensaios;
- a resistência longitudinal é maior à tracção do que à compressão;
- as resistências ao corte via tracção e compressão são idênticas, apesar do processo de dano subsequente ser algo diferente em termos de evolução da tensão, se bem que implique em ambos os casos deformações muito elevadas;
- o comportamento à flexão longitudinal está em linha com os resultados dos ensaios à tracção e compressão, sendo a ruptura ditada pela compressão e encurvadura localizada;
- a resistência à flexão dos provetes $[(\pm 45)_3/45]$ é bastante superior às resistências à tracção e compressão, facto que decorrerá do carácter mais localizado do dano inicial e do longo processo de dano subsequente.

Tabela 3.7: Resumo dos módulos de elasticidade médios medidos nos provetes vidro(WF)/epóxico.

Designação	Ensaio	Valor(GPa)
Longitudinal, E_1	Tracção	17.9
	Compressão	18.2
	Flexão	18.7
Axial, E_x de $[(\pm 45)_3/45]$	Tracção	7.8
	Compressão	6.3
	flexão	8.5
Corte, G_{12}	Tracção	2.4

Tabela 3.8: Resumo dos resultados experimentais médios das resistências dos provetes vidro(WF)/epóxico.

Designação	Valor(MPa)
σ_{ut1}	327
σ_{uc1}	278
σ_{uf1}	292
τ_{u12} (tracção)	34.6
τ_{u12} (compressão)	35.3
σ_{uxt} de[(± 45) ₃ /45]	69.2
σ_{uxc} de[(± 45) ₃ /45]	70.6
σ_{uxf} de[(± 45) ₃ /45]	132

Capítulo 4

Resultados experimentais dos provetes vidro(UD)/poliéster

4.1 Ensaios de tracção

A figura 4.1 apresenta as 5 curvas tensão-deformação medidas em provetes $[0]_5$, enquanto a tabela 4.1 resume os principais resultados. Constata-se o comportamento praticamente linear até a ruptura destes provetes. Todavia, apesar da baixa dispersão nos resultados, a ruptura ocorreu de forma diferente nos vários provetes.

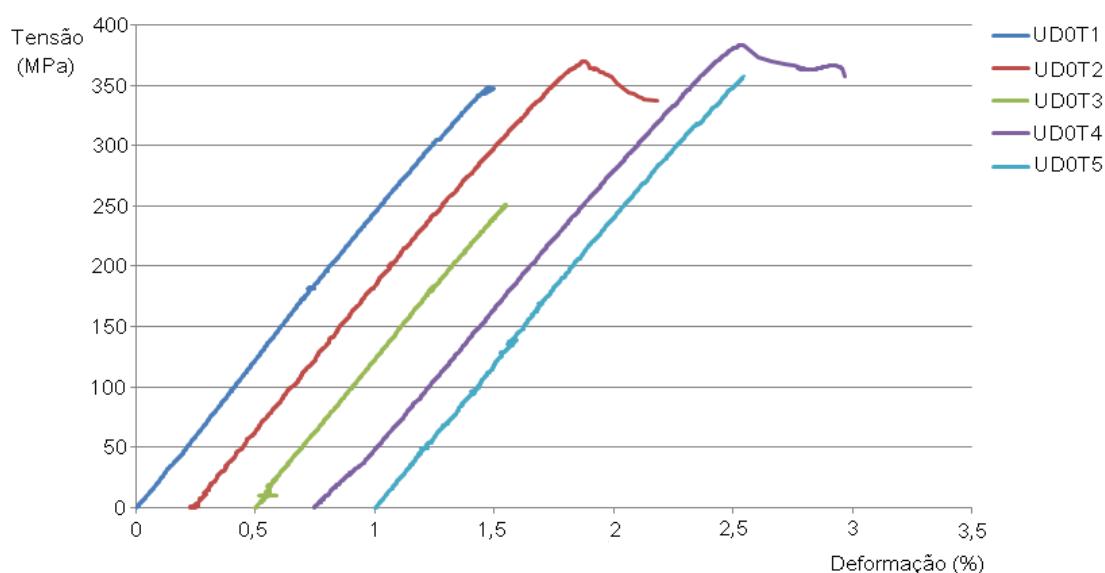


Figura 4.1: Curvas tensão-deformação de 5 provetes vidro(UD)/poliéster à tracção longitudinal. Cada curva está deslocada horizontalmente de 0.25% em relação à anterior.

Na realidade, os provetes UD0T3 e UD0T5 não atingiram a ruptura devido ao deslocamento

Tabela 4.1: Resultados dos ensaios dos provetes vidro(UD)/poliéster à tracção longitudinal. O coeficiente de correlação refere-se à regressão linear usada para calcular o módulo. Os resultados dos provetes 1, 3 e 5 não são considerados no cálculo da tensão de ruptura média.

Provetes UD0T	σ_{ut1} (MPa)	ε_{ut1} (%)	E_1 (GPa)	Coeficiente correlacção	Ruptura
1	348.014	1.5007	23.904	0.9995	esmagamento no suporte sup.
2	370.123	1.6249	23.898	0.9989	no centro
3	—	—	23.620	0.9993	não houve
4	383.227	1.7811	23.601	0.9999	no centro
5	357.371	1.5453	23.958	0.9980	não houve
Média	376.675	1.703	23.796		
D. Padrão (%)	9.27	0.11	0.72		

dos insertos (figura 4.2). Por seu turno, o provete UD0T1 sofreu ruptura junto ao inserto, provavelmente devido a um excesso de força de aperto das amarras. Apenas os provetes UD0T2 e UD0T4 tiveram ruptura no centro, sendo portanto os únicos resultados válidos. Logo, a representatividade da amostra é muito discutível. É de notar ainda que a presença da manta como camada externa diminui o dano visível à superfície (figura 4.3).



Figura 4.2: Fotografia dos provetes UD0T após os ensaios de tracção.

Ensaaiaram-se também provetes $[90]_5$, cujas curvas tensão-deformação (figura 4.4) revelaram uma surpreendente diminuição da rigidez a tensões muito baixas, inferiores a 15 MPa. Este comportamento deverá ter a ver com a ausência de manta numa das superfícies, o que resultou em algumas irregularidades superficiais. Essas irregularidades devem ter provocado concentração de tensões e portanto fissuração prematura. De facto, constatou-se que os provetes desenvolviam fendas transversais durante o carregamento, apesar da tensão continuar a aumentar.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.3: Fotografias ampliadas dos três provetes que atingiram a ruptura: (a), (c) e (e) vistas superiores dos provetes UD0T1, UD0T2 e UD0T4; (b), (d) e (f) vistas inferiores dos mesmos provetes.

A tabela 4.2 resume os principais resultados, onde se assinala que a ruptura ocorreu junto aos

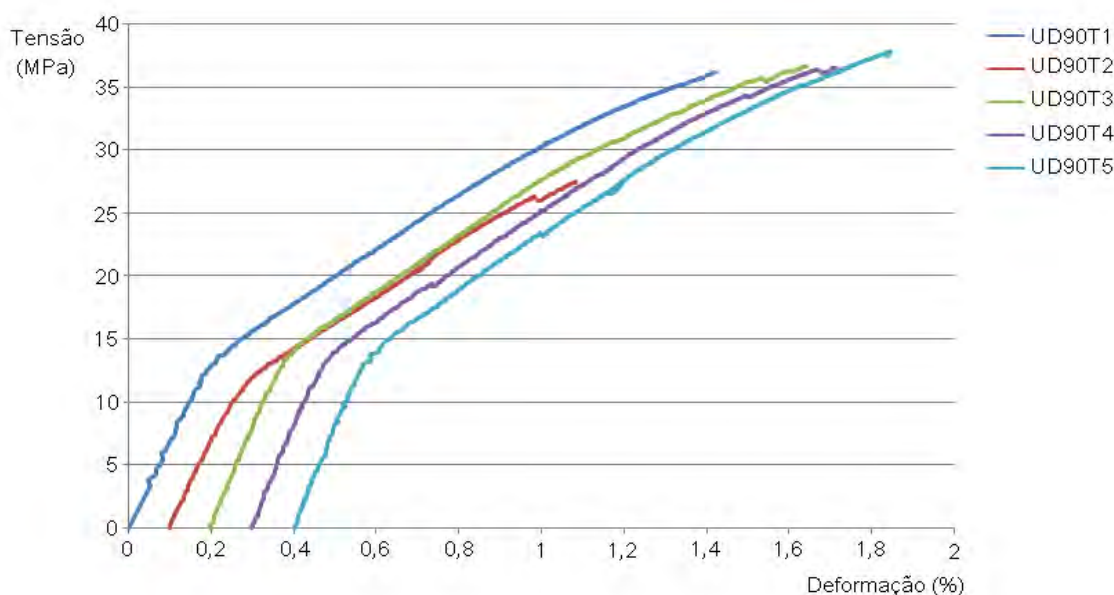


Figura 4.4: Curvas tensão-deformação dos provetes vidro(UD)/poliéster à tracção transversal. Cada curva está deslocada de 0.1% em relação à anterior.

insertos de quase todos os provetes (figuras 4.5 e 4.6). Nestas circunstâncias, optou-se por não excluir qualquer resultado, embora os valores sejam de validade questionável. Numa primeira abordagem, pensou-se que a ruptura junto aos insertos se devesse a algum defeito de fabrico aí localizado. Assim, adicionaram-se acrescentos de 10 mm aos insertos dos últimos três provetes. Infelizmente, constatou-se que a ruptura continuava a acontecer junto dos insertos, com a excepção do provete UD90T4. Por conseguinte, a causa da ruptura junto aos insertos terá sido a concentração de tensões associada à proximidade das amarras de transmissão de carga e às irregularidades superficiais.

Tabela 4.2: Resultados dos ensaios dos provetes vidro(UD)/poliéster à tracção transversal. O coeficiente de correlação refere-se à regressão linear usada para calcular o módulo.

Provetes UD90T	σ_{ut2} (MPa)	ε_{ut2} (%)	E_2 (GPa)	Coeficiente correlação	Ruptura
1	36.268	1.3754	6.729	0.997	2,5mm do inserto superior
2	—	—	6.625	0.9991	5mm do inserto superior
3	36.654	1.4330	7.791	0.9991	1,5mm do inserto inferior
4	36.527	1.4092	7.904	0.999	19mm do inserto inferior
5	37.834	1.4441	7.989	0.998	5mm do inserto inferior
Média	36.821	1.4154	7.408		
D. Padrão (%)	1.89	2.15	9.06		

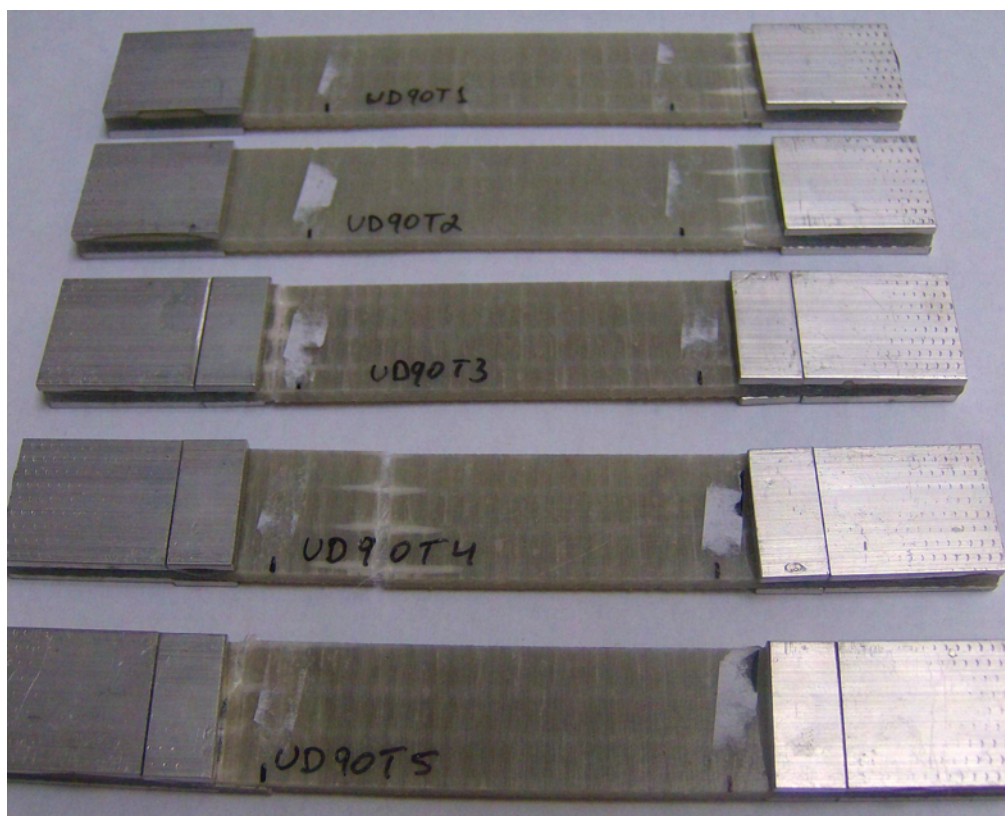


Figura 4.5: Fotografia dos provetes UD90T após os ensaios de tracção.

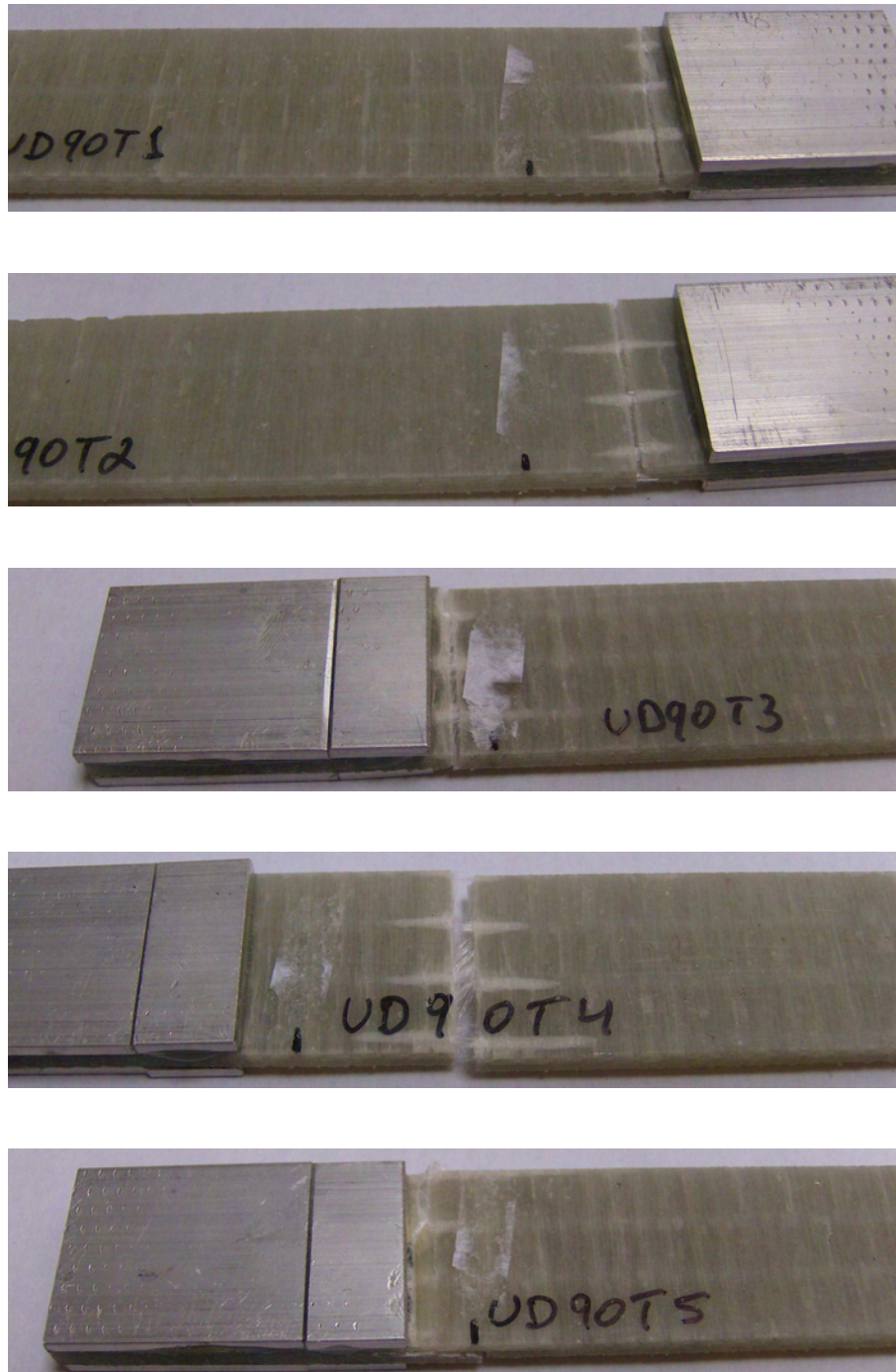


Figura 4.6: Fotografias ampliadas dos provetes UD90T.

4.2 Ensaios de corte via tracção

As curvas tensão-deformação dos provetes $[(\pm 45)_2/45]$ mostraram os habituais desvios de linearidade a tensões relativamente baixas (figura 4.7), devido ao processo gradual de plastificação e dano. Este envolve tensões crescentes devido ao fenómeno de alinhamento das camadas na direcção da carga já referido em 3.2. A tabela 4.3 resume os resultados experimentais obtidos,

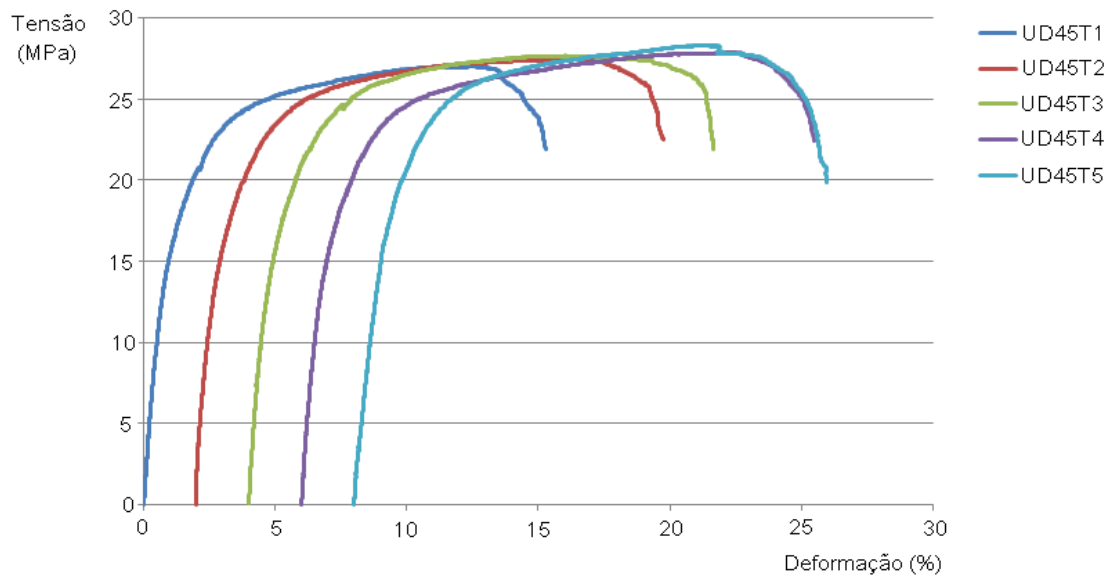


Figura 4.7: Curvas tensão-deformação dos 5 provetes vidro(UD)/poliéster ensaiados ao corte. Para facilitar a visualização, cada curva está deslocada horizontalmente de 2% em relação à anterior.

tendo-se verificado que a ruptura dos provetes ocorreu sempre em zonas afastadas dos insertos (figuras 4.8 e 4.9). O modo de ruptura principal foi, naturalmente, a fissuração transversal das camadas, seguida de delaminação.

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios dos provetes vidro(UD)/poliéster ao corte via tracção. O coeficiente de correlação refere-se à regressão linear usada para calcular o módulo.

Provetes UD45T	τ_{u12} (MPa)	γ_{u12} (%)	G_{12} (GPa)	E_x (GPa)	Coeficiente correlacção
1	25.181	5	1.937	6.008	0.9972
2	25.562	5	1.716	5.470	0.9974
3	26.055	5	1.917	5.937	0.9950
4	25.382	5	1.835	6.247	0.9976
5	26.179	5	—	6.236	0.9973
Média	25.672	—	1.851	5.979	
D. Padrão (%)	1.68	—	5.43	5.29	

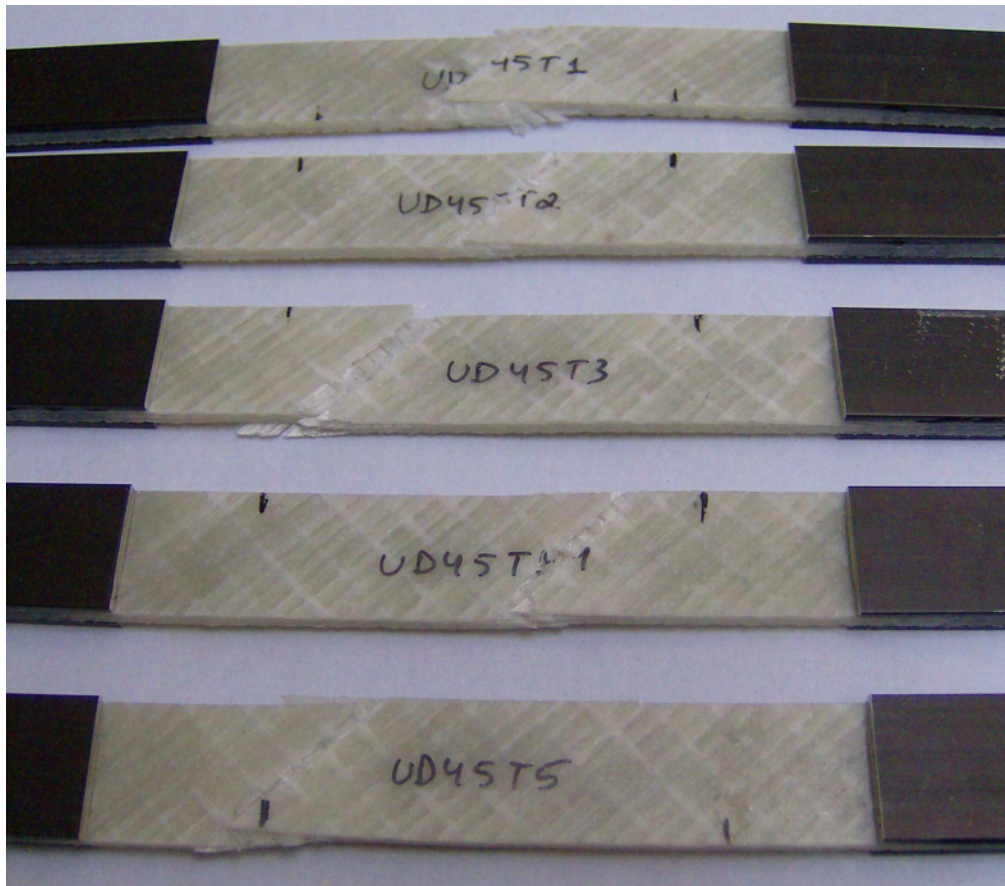


Figura 4.8: Fotografia dos provetes UD45T após os ensaios de corte.

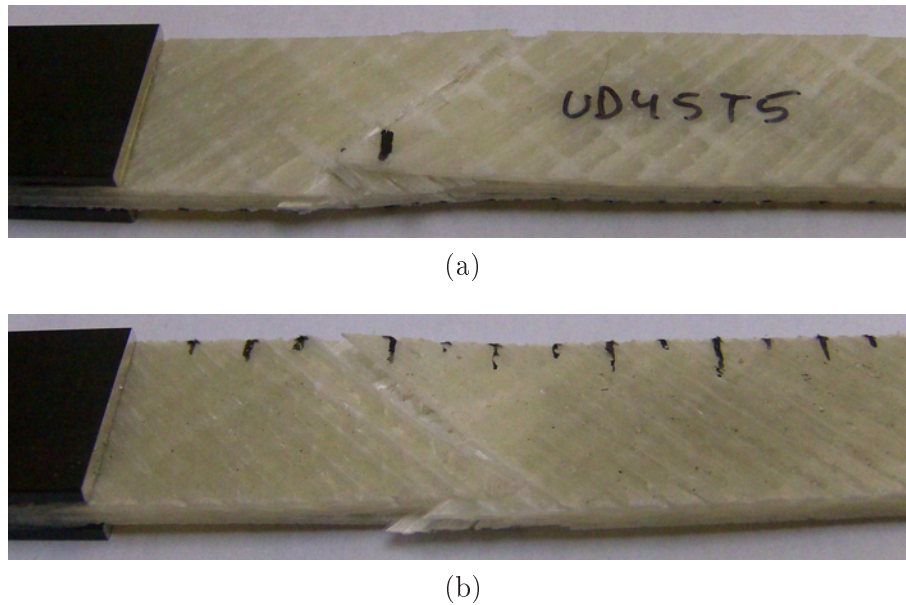


Figura 4.9: Fotografias ampliadas do provete UD45T5: (a) vista superior e (b) vista inferior.

4.3 Ensaios de compressão

As curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão de provetes vidro(UD)/poliéster $[0]_5$ apresentaram uma zona linear inicial apreciável (figura 4.10). A não-linearidade subsequente antes da tensão máxima deve-se principalmente ao comportamento das camadas laterais de *Araldite*.

A tabela 4.4 apresenta os resultados principais, onde se destacam os módulos muito semelhantes aos de tracção longitudinal (ver tabela 4.1) e tensões de ruptura algo inferiores, tal como se verificou nos provetes vidro(WF)/epóxico.

Tabela 4.4: Resultados dos ensaios dos provetes vidro(UD)/poliéster à compressão longitudinal.

Provetes UD0C	σ_{uc1} (MPa)	ε_{uc1} (%)	E_1 (GPa)	Coefficiente correlacção
1	297.687	1.6499	29.259	0.9984
2	—	—	—	—
3	315.916	1.6819	24.867	0.9998
4	318.847	2.2777	25.618	0.9995
5	299.264	1.9191	27.546	0.9995
6	303.243	2.0666	22.928	0.9996
Média	307.929	1.8821	26.572	
D. Padrão (%)	3.57	15.40	8.38	

Todavia, verificou-se que a ruptura ocorreu junto aos topos (figuras 4.11 e 4.12), provavel-

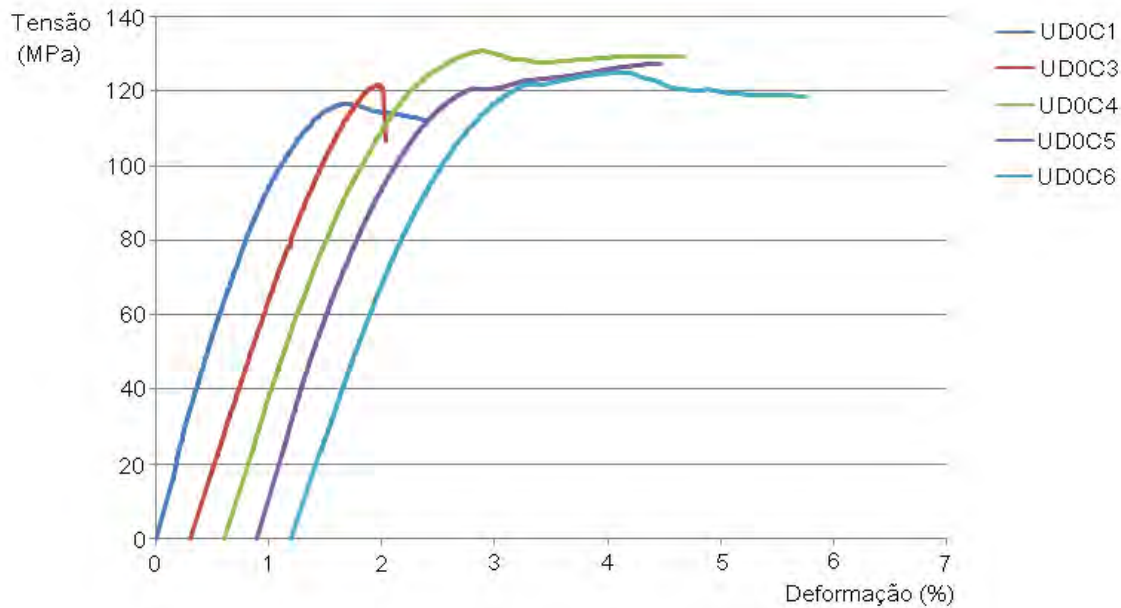


Figura 4.10: Curvas tensão–deformação dos 6 provetes vidro(UD)/poliéster ensaiados à compressão longitudinal. Para facilitar a visualização, cada curva está deslocada horizontalmente em 0.3 % em relação à anterior.

mente devido a ligeiros desalinhamentos e a esmagamento local, que era previsível face à baixa resistência à tracção transversal. Evidentemente, isto coloca em causa a validade dos resultados, na medida em que a tensão de ruptura pode estar subestimada.

Realizaram-se também ensaios de compressão transversal em provetes $[90]_5$ (figura 4.13). Mais uma vez, os módulos medidos (tabela 4.5) estiveram em muito boa concordância com os obtidos nos ensaios de tracção (ver 4.2). As tensões de ruptura, porém, são substancialmente superiores. Isto é habitual em compósitos UD, dado que as matrizes poliméricas resistem melhor à compressão do que à tracção.

Tabela 4.5: Resultados dos ensaios dos provetes vidro(UD)/poliéster à compressão transversal.

Provetes UD90C	σ_{uc2} (MPa)	ε_{uc2} (%)	E_2 (GPa)	Coefficiente correlacção
1	95.013	1.5463	7.834	0.9999
2	99.579	1.9038	7.528	0.9998
3	97.794	1.8543	6.842	0.9991
4	—	1.5485	—	0.9996
5	93.639	1.9292	7.058	0.9998
Média	96.506	1.7564	7.315	
D. Padrão (%)	2.78	10.97	6.14	

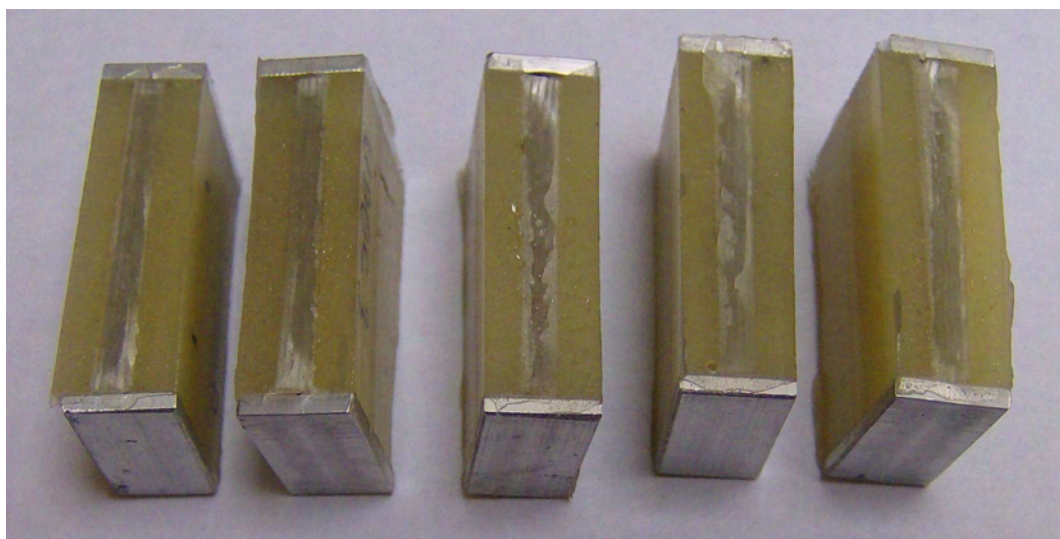


Figura 4.11: Fotografia dos provetes UD0C após os ensaios de compressão.



Figura 4.12: Fotografias ampliadas do provete UD0C3: (a) vista superior e (b) vista inferior.

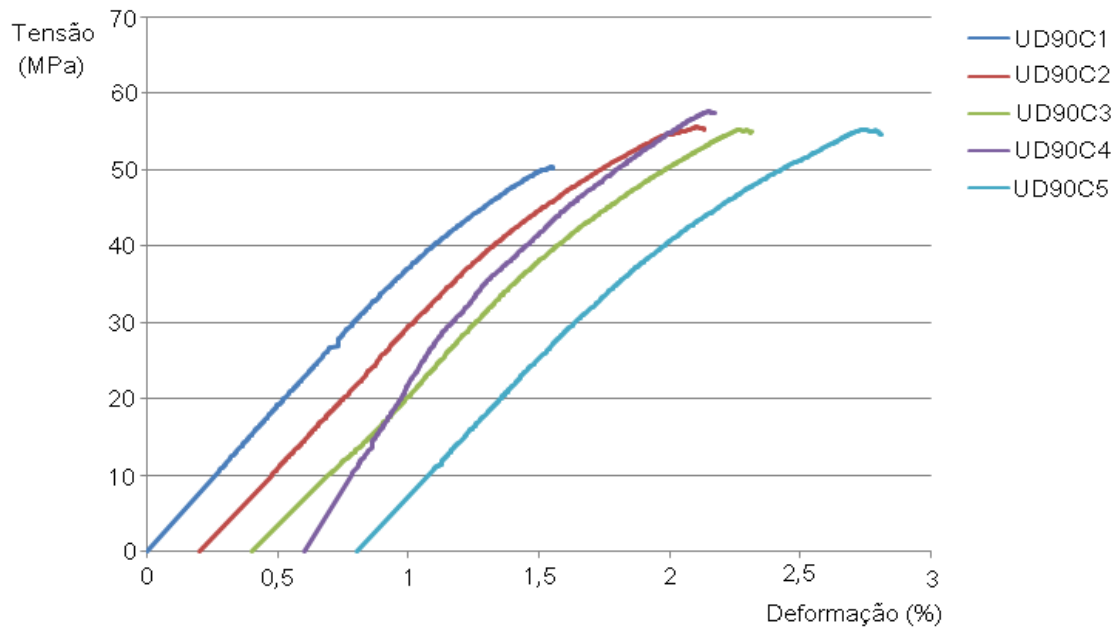


Figura 4.13: Curvas tensão–deformação dos 6 provetes vidro(UD)/poliéster ensaiados à compressão transversal. Cada curva está deslocada horizontalmente em 0.2% em relação à anterior.

Observou-se que a ruptura ocorreu nas zonas centrais dos provetes (figuras 4.14 e 4.15), sendo a superfície de fractura inclinada. Este modo de ruptura é habitual em compósitos espessos e está na base do critério de ruptura de Puck [8].

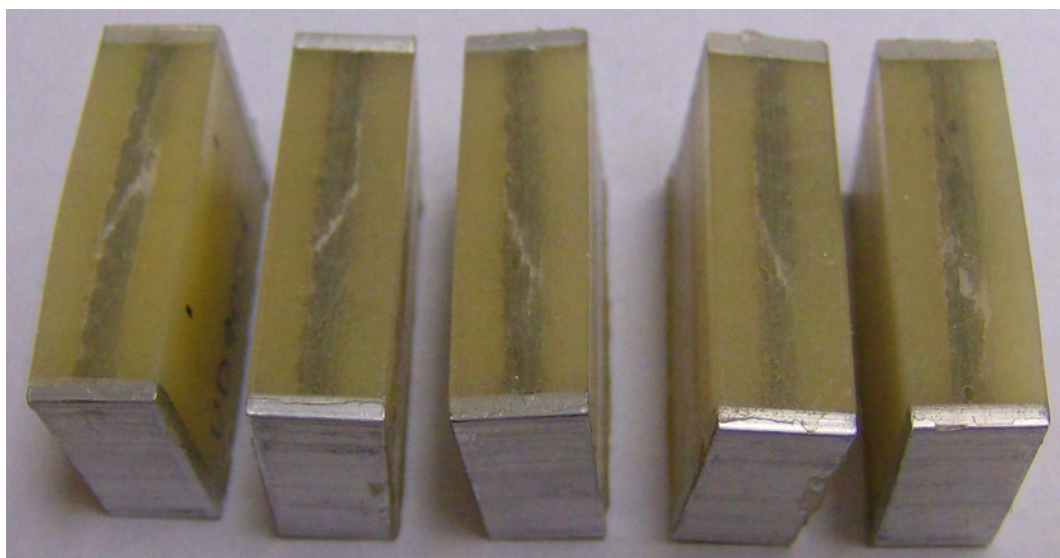


Figura 4.14: Fotografia dos provetes UD90C após os ensaios de compressão.



(a)



(b)

Figura 4.15: Fotografias ampliadas do provete UD90C3: (a) vista superior e (b) vista inferior.

4.4 Ensaaios de corte via compressão

Os ensaios de compressão de provetes $[(\pm 45)_2/45]$ revelaram uma zona inicial linear relativamente pequena (figura 4.16). Pelas razões já referidas em 3.4, o processo de danificação implica uma redução da tensão após um pico, ao contrário do que sucede nos ensaios de corte via tracção.

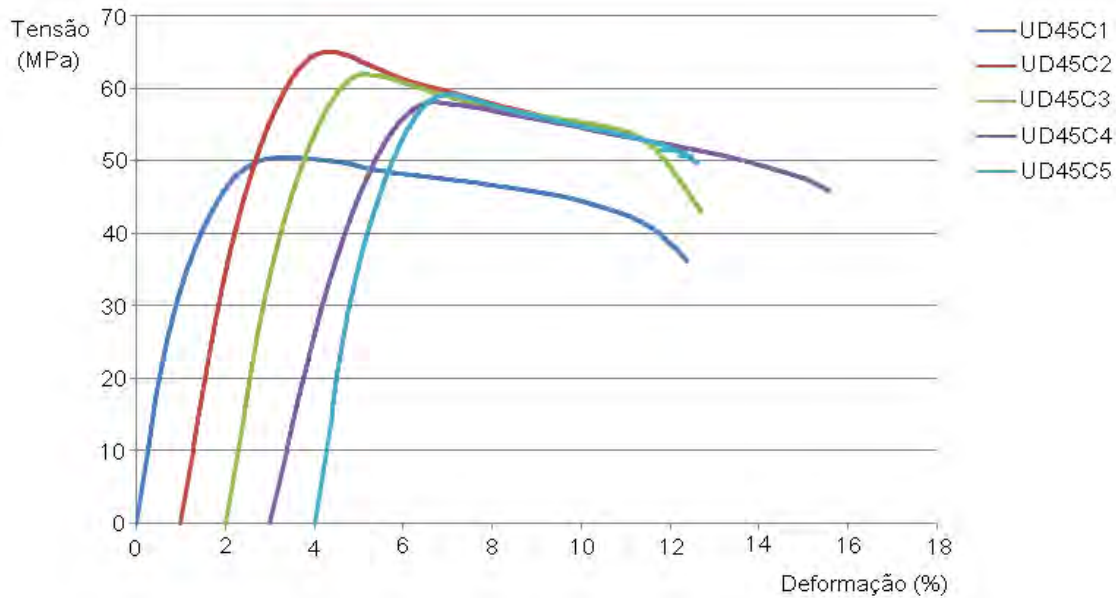


Figura 4.16: Curvas tensão–deformação dos 5 provetes vidro(UD)/poliéster ensaiados ao corte via compressão. Cada curva está deslocada horizontalmente de 1% em relação à anterior.

A tabela 4.6 resume os resultados obtidos para a tensão de ruptura ao corte e para as deformações axiais de ruptura e módulo axial, pois neste ensaio não foi medida a deformação transversal. Notar que o módulo axial E_x é algo superior ao medido no ensaio de corte via tracção (tabela 4.3). Além disso, ao contrário do que sucedeu com os provetes vidro(WF)/epóxico, a tensão de ruptura ao corte medida neste ensaio é substancialmente superior à medida no ensaio de tracção. Isto pode dever-se ao facto da resistência da manta ser superior à compressão do que à tracção.

As figuras 4.17 e 4.18 mostram fotografias dos provetes pós-ensaio, onde é possível observar algum dano nos bordos, e também embarrilamento dos provetes ensaiados até deformações mais altas.

Tabela 4.6: Resultados dos ensaios dos provetes vidro(UD)/poliéster ao corte via compressão.

Provetes UD45C	τ_{u12} (MPa)	ε_x (%)	E_x (GPa)	Coefficiente correlacção
1	—	3.0380	7.796	0.9993
2	44.053	3.2328	6.781	0.9992
3	41.752	3.0533	6.897	0.9997
4	31.928	3.6853	—	0.9996
5	38.558	2.9281	8.192	0.9985
Média	39.073	3.1875	7.417	
D. Padrão (%)	13.49	9.38	9.27	

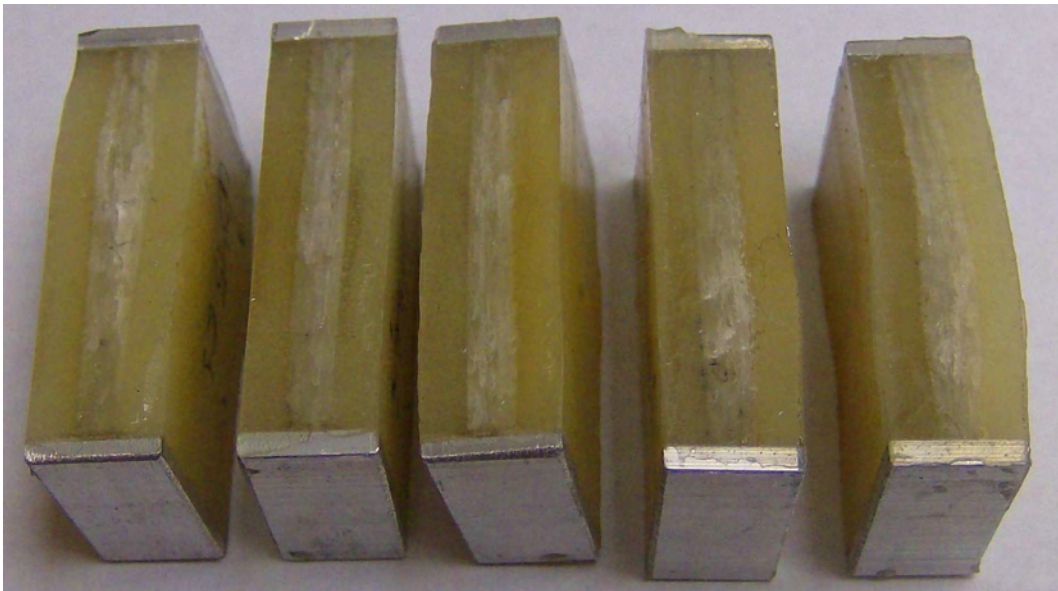


Figura 4.17: Fotografia dos provetes UD45C após os ensaios de compressão.

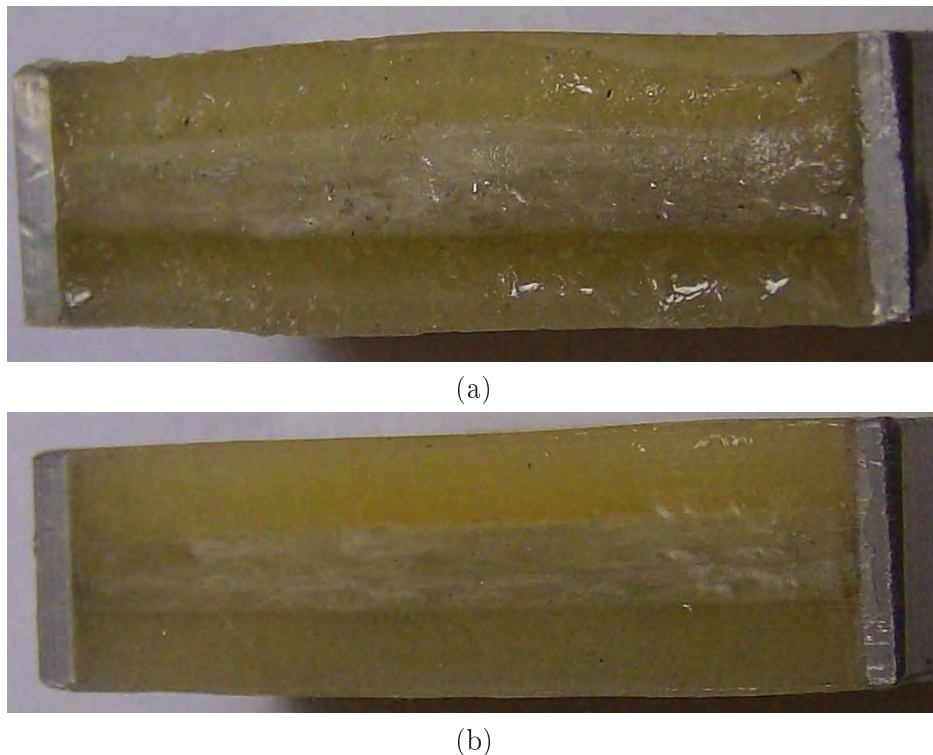


Figura 4.18: Fotografias ampliadas do dois lados do provete UD45C3.

4.5 Ensaaios de flexão

Apresentam-se agora os resultados dos ensaios de flexão longitudinal realizados nos provetes [0]₅. As curvas carga-deslocamento (δ)/distância entre apoios externos(L) (figura 1.9b) tiveram uma ampla zona inicial, seguida de danificação gradual que envolveu algum acréscimo de carga (figura 4.19). Os módulos de flexão medidos estão próximos dos módulos longitudinais de tracção (ver tabela 4.1) e compressão (ver tabela 4.10), mas as tensões de ruptura são claramente superiores (tabela 4.7). Na realidade, constatou-se que o modo de ruptura era sensível à superfície que estava exposta a tracção. Quando se tratava da superfície com melhor acabamento superficial, com manta exterior, desenvolviam-se várias fissuras de tracção nesta (figuras 4.20 e 4.21). Na situação inversa, experimentada com o provete UD0F2, surgiram fendas transversais na camada exterior UD. De qualquer forma, a ruptura deu-se sempre na superfície inferior, sujeita a tensões de tracção, o que aparentemente contradiz o facto da resistência longitudinal ser maior à tracção (tabela 4.1) do que à compressão (tabela 4.4). Esta discrepância pode dever-se ao facto de ter havido ruptura prematura junto aos topos nos provetes de compressão, ou devido ao papel relevante da manta, que terá melhor resistência à compressão. De qualquer forma, a estrutura de camadas alternadas de tecido UD - manta e a natureza do carregamento podem explicar o facto da resistência à flexão ser maior do que as resistências à tracção e à compressão.

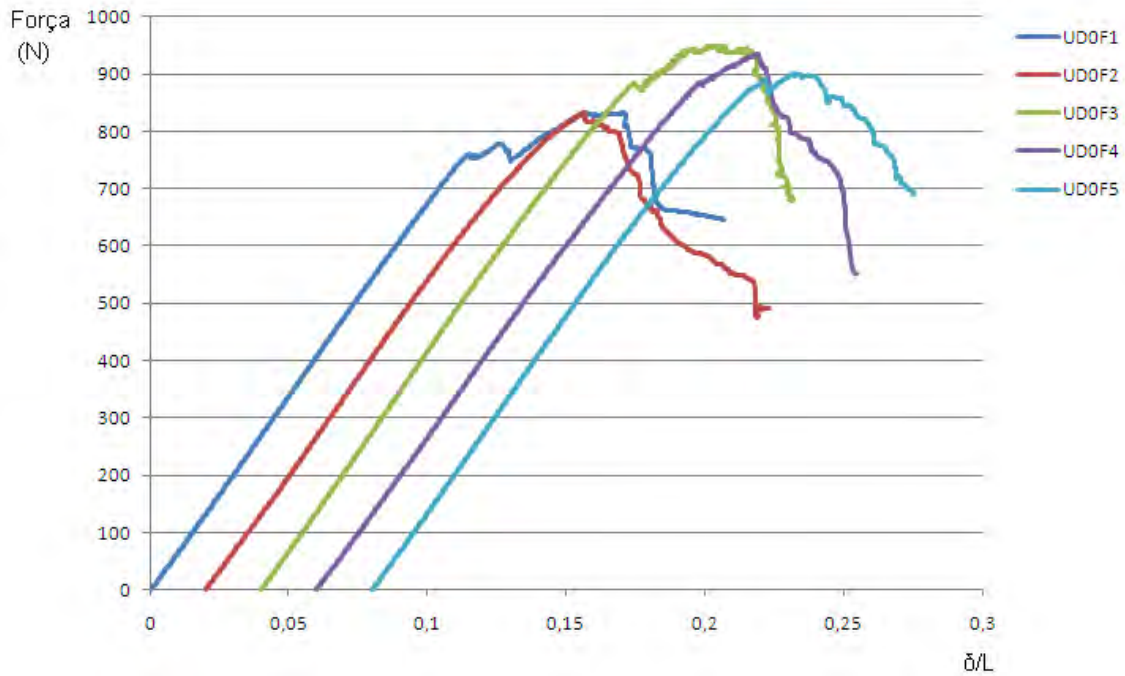


Figura 4.19: Curvas carga–deslocamento/vão dos 5 provetes vidro(UD)/poliéster à flexão longitudinal. Cada curva está deslocada horizontalmente de 0.02 em relação à anterior.

Tabela 4.7: Resultados dos ensaios dos provetes vidro(UD)/poliéster à flexão longitudinal.

Provetes UD0F	δ (mm)	δ/L (%)	σ_{uf1} (MPa)	E_{f1} (GPa)	Coeficiente correlação	Ruptura
1	9.59	11.99	471.760	25.885	0.99992	superfície inferior
2	10.88	13.59	495.610	23.772	0.99986	"
3	12.36	15.45	561.840	24.830	0.99997	"
4	11.05	13.81	524.650	23.741	0.99998	"
5	11.34	14.18	552.870	26.064	0.99998	"
Média	11.04	—	521.346	24.858		
D. Padrão (%)	9.00	—	7.28	4.47		

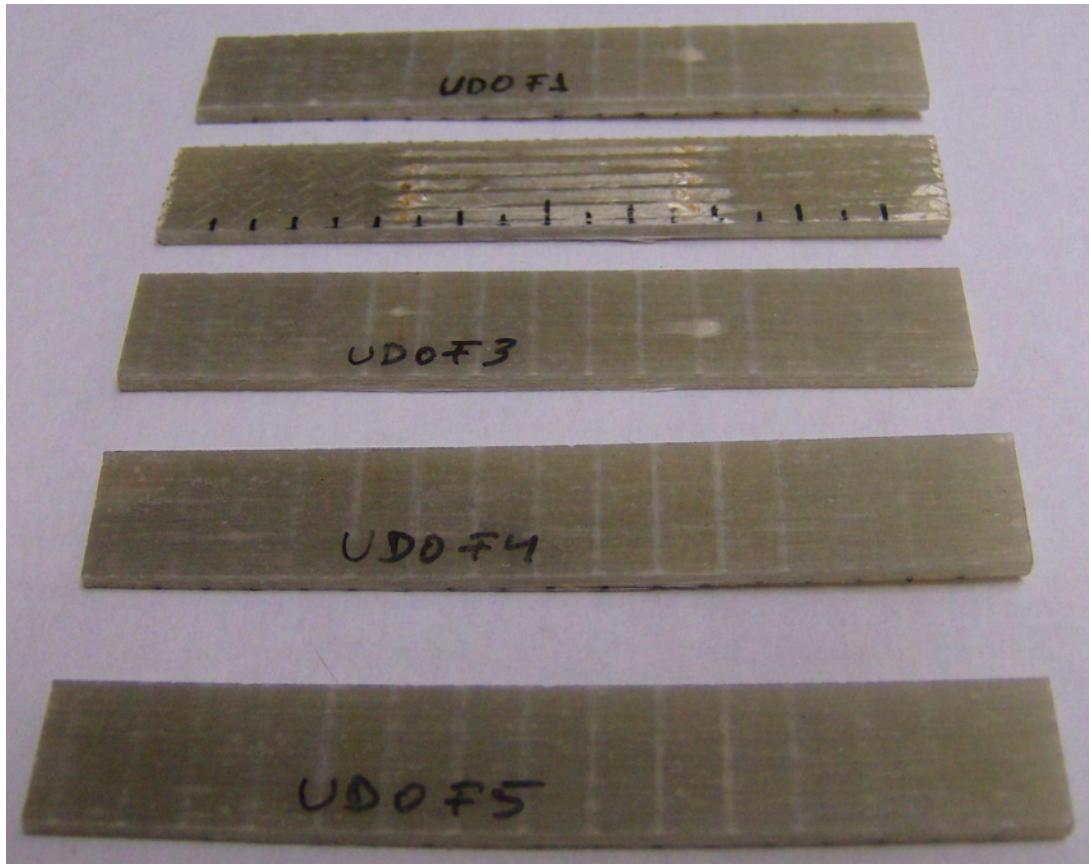


Figura 4.20: Fotografia dos provetes UD0F após os ensaios de flexão.



(a)



(b)

Figura 4.21: Fotografias ampliadas dos provetes UD0F2((a)) e UD0F5((b)) da zona de ruptura sujeita a tensões de tracção.

Finalmente, os resultados dos ensaios de flexão dos provetes $[(\pm 45)_2/45]$ mostraram curvas carga- δ/L com acentuada não-linearidade antes de um patamar (figura 4.22). Como se vê na tabela 4.8, o módulo de flexão ficou entre os valores do módulo axial dos ensaios de corte via tracção (tabela 4.2) e compressão (tabela 4.4). Ao invés, a tensão de ruptura foi superior. Após os ensaios os provetes tinham acumulado deformações plásticas e dano (figuras 4.23 e 4.24), mas era evidente que os ensaios poderiam ter sido prolongados até deslocamentos muito elevados.

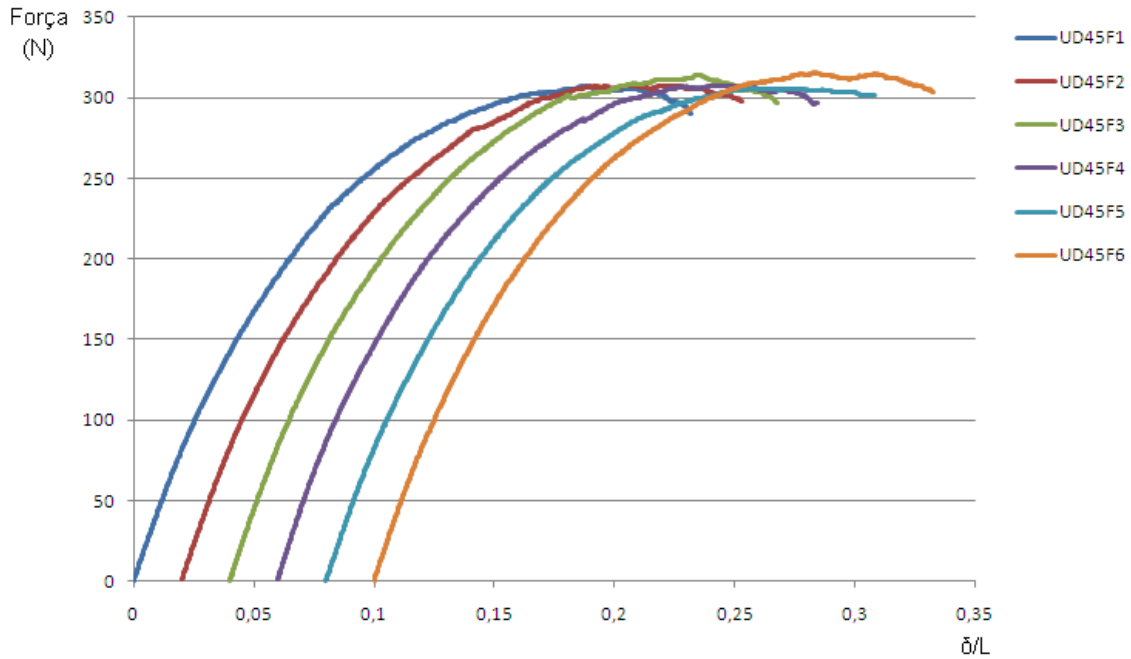


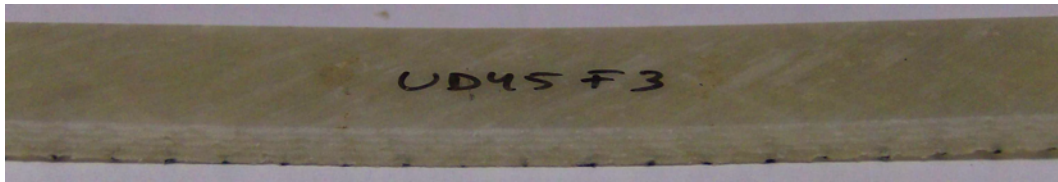
Figura 4.22: Curvas carga–deslocamento/vão dos 6 provetes vidro(UD)/poliéster UD45F. Cada curva está deslocada horizontalmente de 0.02 em relação à anterior.



Figura 4.23: Fotografia dos provetes UD45F após os ensaios de flexão.

Tabela 4.8: Resultados dos ensaios de flexão dos provetes vidro(UD)/poliéster UD45F.

Provetes UD45F	δ (mm)	δ/L (%)	σ_{ufx} (MPa)	E_{fx} (GPa)	Coeficiente correlacção	Ruptura
1	14.55	18.18	96.050	6.705	0.99979	não houve
2	12.95	16.19	94.868	6.781	0.99980	"
3	11.08	13.85	94.019	6.972	0.99977	"
4	13.21	16.51	95.691	7.178	0.99972	"
5	13.45	16.81	94.322	6.739	0.99978	"
6	12.31	15.39	95.698	6.783	0.99980	"
Média	12.93	—	95.108	6.860		
D. Padrão (%)	8.99	—	0.87	2.64		



(a)



(b)

Figura 4.24: Fotografias ampliadas dos provetes UD45F3: (a) vista superior e (b) vista inferior.

4.6 Conclusões relativas aos laminados vidro(UD)/poliéster

A dispersão estatística nos resultados dos ensaios dos provetes vidro(UD)/poliéster foi relativamente baixa, se bem que geralmente maior do que a observada nos provetes vidro(WF)/epóxico. Obviamente, isto abona em favor dos procedimentos seguidos na preparação das amostras e nos ensaios. Todavia, foram notórios maiores problemas nos ensaios, que conduziram frequentemente a rupturas junto aos pontos de transmissão de carga. Isto afectou os valores de σ_{ut1} , σ_{uc1} e de σ_{ut2} . Estas dificuldades devem-se sobretudo à natureza UD do reforço, mas também à componente de reforço por manta.

Não obstante, salientam-se as seguintes conclusões principais:

- a boa concordância entre os valores do módulo longitudinal medidos nos vários tipos de ensaios realizados (tabela 4.9);
- as diferenças nas resistências longitudinais, e de corte e axiais dos laminados $[(\pm 45)_2/45]$, consoante tenham sido medidas em ensaios de tracção, compressão e sobretudo de flexão; estas diferenças sugerem um papel relevante da manta na resistência do compósito, apesar daquela ter estado em muito menor proporção do que o tecido UD;
- os valores relativamente baixos da resistência à tracção transversal e da resistência ao corte, que parecem ter sido afectadas por fissuração prematura; aqui parece que a ausência de manta numa das superfícies do laminado poderá ter tido uma influência nefasta.

Tabela 4.9: Resumo dos módulos de elasticidade médios medidos nos provetes vidro(UD)/poliéster.

Designação	Ensaio	Valor(GPa)
Longitudinal, E_1	Tracção	23.8
	Compressão	26.6
	Flexão	24.9
Transversal, E_2	Tracção	7.4
	Compressão	7.3
Axial, E_x de $[(\pm 45)_2/45]$	Tracção	6.0
	Compressão	7.4
	flexão	6.9
Corte, G_{12}	Tracção	1.9

Tabela 4.10: Resumo das resistências médias medidas nos provetes vidro(UD)/poliéster.

Designação	Valor(MPa)
σ_{ut1}	376.7
σ_{uc1}	307.9
σ_{uf1}	521.3
σ_{ut2}	36.8
σ_{uc2}	96.5
τ_{u12} (tracção)	25.7
τ_{u12} (compressão)	39.1
σ_{uxt} de $[(\pm 45)_2/45]$	51.4
σ_{uxc} de $[(\pm 45)_2/45]$	78.1
σ_{uxf} de $[(\pm 45)_2/45]$	95.1

Capítulo 5

Conclusões

O objectivo principal deste trabalho era o de caracterizar o comportamento mecânico de dois materiais compósitos, sendo um reforçado por fibra de vidro quase-unidireccional(UD) e com matriz poliéster e o outro reforçado por tecido bidireccional (WF - *woven fabric*) de fibra de vidro e com matriz de resina epóxida.

Durante a revisão do estado da arte relativo aos ensaios de compressão, verificou-se que os métodos existentes eram complexos e davam resultados questionáveis. Estes problemas estiveram na base do segundo objectivo deste trabalho, que consistiu no desenvolvimento e implementação de um novo método de ensaio à compressão.

Os laminados dos quais se obtiveram os provetes foram produzidos por moldação manual. Posteriormente, realizaram-se ensaios de tracção, compressão, corte e flexão em laminados dos tipos $[0]_n$, $[90]_n$ e $[\pm 45]_n$. Os resultados obtidos permitiram tirar as conclusões específicas de cada material e de cada ensaio já resumidas nos capítulos 3.6 e 4.6. Por seu turno, numa perspectiva global, as principais conclusões são as seguintes:

- O procedimento adoptado para fabrico dos laminados, nomeadamente a utilização de um molde fechado com barreiras de controlo da espessura, esteve seguramente na base das baixas dispersões estatísticas nos resultados. De facto, os desvios padrão nas propriedades foram frequentemente inferiores a 10 % dos valores médios, e nunca ultrapassaram 21 %. É de salientar também a reduzida rejeição de resultados num total de 14 ensaios com um mínimo de 5 provetes cada.
- As propriedades elásticas e as tensões de ruptura medidas nos vários ensaios de provetes vidro(WF)/epóxido revelaram-se muito consistentes, sobretudo nos provetes $[0]_n$. Além disso, os modos de ruptura foram quase sempre válidos, pelo que os objectivos traçados ao nível da caracterização foram todos atingidos, excepto no que toca ao coeficiente de Poisson.
- Houve mais problemas de consistência de resultados entre ensaios e de modos de ruptura indesejados nos provetes vidro(UD)/poliéster. Em particular, foram medidos valores baixos

para resistências, que muito provavelmente se deveram às irregularidades na superfície sem manta.

- Os resultados obtidos com o novo método de ensaio à compressão revelaram-se muito satisfatórios, na medida em que o método foi totalmente eficaz a evitar encurvadura e a promover a ruptura na zona central, exceptuando o caso da compressão longitudinal dos provetes vidro(UD)/poliéster.

Por fim, é evidente que deste trabalho surgiram algumas questões a esclarecer em estudos futuros, particularmente as seguintes:

- Definir as condições para medição rigorosa com videoextensómetro das deformações transversais em provetes relativamente estreitos quando se usam comprimentos de medida longitudinal elevados.
- Determinar a influência da presença da manta de reforço associada ao tecido UD nas propriedades mecânicas dos laminados vidro(UD)/poliéster, sobretudo nas resistências que este trabalho mostrou serem baixas. Para tal seria de produzir laminados sem a referida manta e com manta nas duas superfícies.
- Estudar a tenacidade interlaminar dos materiais ensaiados neste trabalho. Em particular, avaliar o efeito da presença da manta nas interfaces entre camadas quando se usa o tecido UD.

Bibliografia

- [1] Moura M. F. S. F., Morais A. B., and Magalhaes A. G. *Materiais compostos-materiais, fabrico e comportamento mecanico*. Publindustria, 2005.
- [2] I. M. Daniel and O. Ishai. *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford University Press, 1994.
- [3] E. Greene. *Marine composites*. 2nd edition.
- [4] Ronald F. Gibson. *Principles of composite material mechanics*. CRC Press, 2nd edition, 2007.
- [5] P. K. Mallick. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. Marcel Dekker, 2nd edition, 1993.
- [6] H. G. Karian. *handbook of polypropylene and polypropylene composites:.* Marcel Dekker, 1999.
- [7] J. M. Hodgkinson. *Mechanical testing of advanced fibre composites:.* Woodhead Publishing Ltd, 2000.
- [8] H. Schurmann. Puck, A. A failure analysis of frp laminates by means of physically based phenomenological models. *Composites Science and Technology*, Vol. 62:1633–1662, 2002.